

ISAAC ASIMOV

A robbanó Napok

A SZUPERNOVÁK TITKAI

Kossuth Könyvkiadó 1987

A mű eredeti címe: Isaac Asimov: The Exploding Suns
© 1985 by Nightfall, Inc. with E. P. Dutton, New

York,

Fordította:

SZEGEDI PÉTER

A fordítást az eredetivel egybevetette: ÓZ JÁNOS

MARVIN GROSSWIRTH (1932-1984)

EMLÉKÉNEK A KÉPMELLÉKLET 1-2., 4., 5-8. ÉS 10-14. OLDALÁN LEVŐ
FELVÉTELEKET SZÉCSÉNYI-NAGY GÁBOR KÉSZÍTETTE AZ MTA
CSILLAGÁSZATI KUTATÓINTÉZETÉNEK SCHMIDT-TELESZKÓPJÁVAL.

ISBN 963 09 3125 7

ISSN 0324-5098

© HUNGARIAN TRANSLATION © SZEGEDI PÉTER, 1987 (4375)

Tartalom

ÚJ CSILLAGOK

A változatlan égbolt	7
Változás a csillagok világában	10
A kínaiak „vendégszillagai”	14
Az első nóva	17
További nóvák	20

VÁLTOZÉKONY CSILLAGOK

Látjuk a láthatatlant!	22
Mozgás és távolság	26
Nóvák az újkorban	28
Milyen fényes? Mennyire gyakori?	32

KIS ÉS NAGY CSILLAGOK

A napenergia	35
Fehér törpék	39
Vörös óriások	44
A kettőscsillagok és az összeroppanás	47

MÉG NAGYOBB ROBBANÁSOK

Túl a Galaktikán?	51
Az S Andromedae	56
Az Androméda-galaxis	58
Szupernóvák	62

AMI A TÖRPÉKNÉL IS KISEBB

A Rák-köd	
Neutroncsillagok	
A röntgensugarak és a rádióhullámok	
Pulzárak	

KÜLÖNFÉLE ROBBANÁSOK

Az I-es és a II-es típus	82
Fekete lyukak	86

A táguló világegyetem	89
A „big bang”	93
AZ ELEMÉK	
Miből áll a világmindenség?	96
A hidrogén és a hélium	99
Szökés a csillagokból	102
Szökés katasztrófával.....	109
A CSILLAGOK ÉS BOLYGÓIK	
Első generációs csillagok	114
Második generációs csillagok	116
A bolygók keletkezése	121
A Föld kialakulása	125
AZ ÉLET ÉS AZ EVOLÚCIÓ	
A fossziliák	128
Az élet létrejötte	131
A fajfejlődés	134
A genetika	137
A NUKLEINSAVAK ÉS A MUTÁCIÓK	
A gének szerkezete	140
Hogyan változnak meg a gének?	143
Mutációt kiváltó tényezők	146
A kozmikus sugárzás	148
A JÖVŐ	
A Föld mágneses tere.....	155
A „nagy kihalások”	159
A világűr	162
A soron levő szupernóva	163
UTÓSZÓ	
Szupernóva a Nagy Magellán-felhőben (dr. Patkós László).....	167
NÉVMUTATÓ.....	173
TÁRGYMUTATÓ.....	175

Új csillagok

A VÁLTOZATLAN ÉGBOLT

Ha egy derült, holdtalan éjszakán föltekintünk, bizonyára mély benyomást gyakorol ránk az égbolt egészének nyugodt változatlansága. A csillagok állandó elrendeződésben, állandó fényességgel ragyognak. Örök-egyforma körpályán haladnak, amelynek középpontja (föltéve, hogy az északi féltekéről nézzük) a Sarkcsillag közelében van, s amelyet huszonnégy óra alatt járnak be.

Az a látvány, amely pontban éjfélkor tárul elénk, minden éjjel egy kissé odébbtolódik, mintha a Nap tovaagördülne a csillagok háttere előtt, ám sokkal lassabban, mint a naponkénti mozgása során. Ezt a lassúbb keringést 365k nap alatt fejezi be. Mindkét keringés szabályos, és a csillagok elrendeződését egyik sem változtatja meg.

Arisztotelész (i. e. 384-322), a görög filozófus az égboltnak ezt a változatlanságát természettörvénynek tartotta. Úgy vélte, a Földön minden megváltozik és fölbomlik, előbb létrejön, aztán elpusztul; az égen viszont minden változatlan, tökéletes és végleges. A földi dolgok (ha csak nem élők) nyugalomra törekszenek, az égiek viszont soha sincsenek nyugalomban, hanem méltóságteljes, véget nem érő köröket írnak le.

Arisztotelész szerint a Föld és az ég még összetételében is alapvetően különbözik egymástól. A Földön minden négy „elemből”, az anyag négy alapvető változatából: földből, vízből, levegőből és tűzből áll. Az ég, valamennyi égi objektum viszont egy ötödik elemből van, amely tökéletes, természeténél fogva izzik, és amelyet (a görög „égő” szóból) *aithernek* nevezett el. (Nekünk ismerősebb a latin „aether”-ből magyarított „éter” írásmód.)

Bizonyára sok más korai gondolkodó is hitt a mennybolt változatlanságában, de Arisztotelész volt a legkiválóbb, az ő művei maradtak fenn, így mindig ő számított e nézet legtekintélyesebb képviselőjének.

Ezt az elképzelést főképp az teszi indokolttá, hogy összhangban van mindennapi tapasztalatainkkal. Mindannyian saját szemünkkel láthatjuk, hogy a földi dolgok keletkeznek, növekednek, változnak,

elkopnak, felbomlanak és tönkremennek. A Nap és az összes többi égitest viszont, úgy tűnik, örök életű, s a legkevésbé sem változó.

Kétségkívül van egypár olyan jelenség, amely az ég változatlanágának arisztotelészi tétele ellen szól, és ezeket, ha gondosan figyelünk, magunk is észre vesszük. A mennybolton igenis történnek változások, még hozzá eléggé nyilvánvalóak. A felhők például jönnek és mennek, egybefüggő réteggé állnak össze vagy semmivé foszlanak szét. Eső esik vagy más csapadék hull az égből, aztán pedig eláll.

A felhők és a csapadék azonban légköri jelenségek, a levegő pedig egyike a négy arisztotelészi elemnek; ezek tehát a Föld részét képezik. Arisztotelész így gondolta, és ebben a mai csillagászok is készségesen egyetértenek vele. A légkör szerinte a Holdig terjed, amely valamennyi égitest közül a legközelebb van hozzánk. A mennyboltot alkotó éter és a változatlanág tulajdonsága a Holddal veszi kezdetét, vélte, és ide tartozik mindaz, ami a Hold fölött van; ami viszont alatta, az nem.

Csak hogy az időjáráson kívül még másféle változások is vannak az égen. Olykor derült éjszakákon egy-egy mozgó fénypontot pillanthatunk meg a sötét égbolton, amely mozgás közben fokozatosan halványodik, majd hamarosan kihuny. Épp olyan, mintha egy csillag válna le az égről, gyorsan keresztülsiklana rajta, és talán a földre hullana. „Hullócsillagnak” is szoktuk hívni, ám igazából nem csillag: bármennyi ilyet lássunk is, emiatt soha egyetlen csillag sem fog hiányozni az égboltról.

Arisztotelész a hullócsillagokat is a Föld légkörén, atmoszféráján belüli jelenségeknek tartotta. Ezért nevezzük őket *meteoroknak* (a „levegőben lévő dolgok” jelentésű görög szóból). A kifejezés helyesen használva csak a fénycsíkra vonatkozik, és e tekintetben Arisztotelésznek igaza is volt, hiszen az valóban a légkörben jelenik meg. Ezt egy olyan kis tárgy okozza, amelynek mérete sziklányi és gombostűfejnyi között változhat, és amely űrbéli útján véletlenül a Földnek ütközik. Miközben nagyon nagy sebességgel átrohan a Föld légkörén, a légellenállás fehérizzásig hevíti.

Magukat ezeket a tárgyakat ma *meteoroidoknak* nevezik. A kisebbek teljesen elporladnak, mielőtt elérnék a Föld felszínét, és finom porként lebegnek nagyon lassan lefelé. A nagyok legalább részben túlélnek a megpróbáltatást, és egy vagy több darabjuk becsapódik a földfelszínre. Ezek a megmaradó darabok a *meteoritok*. (A tudósok egészen az 1800-as évek elejéig vonakodtak elfogadni, hogy szilárd tárgyak hullhatnak az égből.)

Vannak azután furcsa és szabálytalan (tehát „tökéletlen”) alakú *üstökösök* is, amelyek rendszertelenül jelennek meg és tűnnek el az égen. Kinézetük néha egyik éjszakáról a másikra megváltozik. Arisztotelész szerint azonban ezek lángoló gőzcsovák a magaslégkörben, ezért a Földhöz, nem pedig az éghez tartoznak. (Itt kifejezetten melléfogott, de csak az 1500-as évek végén mutatták ki, hogy tévedésről van szó.)

Ha az időjárástól, a meteoroktól és az üstökösöktől eltekintünk, akkor vizsgálódásaink számára egyedül a Hold és az azon túl levő égi objektumok maradnak.

Maga a Hold kétségkívül mutat bizonyos változásokat. Alakja éjszakáról éjszakára változik, egy sor *fázison* megy át (ez a görög „megjelenés” szóból származik). Még telihold idején is, amikor szabályos fénykörnek látszik (tehát olyan tökéletes formát mutat, ami egy égitesttől elvárható), akkor is árnyékok és foltok tarkázzák, ami nyilvánvalóan a „tökéletlenség” jele.

Ezt két úton-módon lehetett kimagyarázni. Az ókorban és a középkorban számosan rámutattak, hogy mivel valamennyi égitest közül a Hold van legközelebb a Földhöz, ezért ő van leginkább kiteve a tökéletlen és „romlott” Föld hatásának. A foltok tehát nem egyebek, mint a Föld kigőzölgései.

A holdváltozások másik magyarázata úgy szólt, hogy egy tökéletes égbolton is megengedhetőek a változások, ha azok ciklikusan, újra és újra, vég nélkül ismétlődnek. A szabálytalanság, ha sohasem változik, nem jelent föltétlenül tökéletlenséget.

A Hold foltjai nem változtak, fázisai pedig olyan szabályosan ismétlődtek, hogy könnyű volt akár évekre előre megjósolni, milyen fázisban lesz a Hold egy adott éjszakán.

A Holddal kapcsolatban az jelentett további problémát, hogy bár keleten kel, nyugat felé halad az égen, nyugaton nyugszik, akárcsak a Nap és a csillagok, mégsem követi pontosan a csillagokat. A Holdat minden éjjel máshol találjuk a csillag-háttérhez képest; a pontosabb megfigyelés pedig azt mutatta, hogy állandóan nyugatról keletre mozog ezen háttér előtt, valamivel több mint huszonhét nap alatt téve meg egy teljes kört az égen.

A Nap, mint már említettem, szintén nyugatról keletre mozdul el a csillagok háttére előtt. Mozgása lényegesen lassúbb a Holdénál: egy égi kör megtételéhez 365 napra van szüksége.

Sem a Holdnak, sem a Napnak nem teljesen szabályos a csillagokhoz viszonyított mozgása; az ókoriak szemében azonban még rosszabb volt az, hogy az öt legfényesebb csillag maga is elmozdul a csillag-háttérhez képest. A megilletődött megfigyelők ezeknek az istenek neveit adták, és még mi is azokon az istenneveken hívjuk őket, amelyeket a rómaiaktól kaptak: Merkúr, Vénusz, Mars, Jupiter és Szaturnusz. Míg a Hold és a Nap a többi csillaghoz viszonyítva folyton nyugatról kelet felé halad, addig ezek időnként lassítanak, aztán megfordulnak, és „retrográd” módon elindulnak keletről nyugat felé. Azután megint megfordulnak, és egy ideig a szokásos módon mozognak; s ez a folyamat ismétlődik újra meg újra. Hogy ezt a retrográd mozgást milyen gyakran engedhetik meg maguknak, az eléggé eltérő: a Mars nagyjából egyszer, a Szaturnusz viszont huszonkilenc alkalommal egy, az égen megtett teljes kör során.

ni, hogy milyen hatással lesznek minden egyes ember jövőbeli sorsára. Az ókorban mindenkit élénken érdekelt az *asztrológia* (csillagjósolás) efféle rendszerének megteremtése.

A Nap, a Hold és az öt csillagszerű bolygó egyaránt az ég egy keskeny sávjában mozog, amelyet tizenkét tartományra osztottak föl. Ezek mindegyikét egy-egy csillagcsoport foglalja el, amelyeket az élénk képzeletű ókoriak valamilyen tárgy, rendszerint egy állat képeként különböztettek meg. Ezeket a csoportokat *csillagképeknek* hívják, a tizenkét csillagképet pedig, amelyeken a bolygók áthaladnak, együttesen *állatövnek* vagy „zodiákusnak” nevezik (az „állatok köre” jelentésű görög kifejezésből).

Közbevetőleg: miért éppen tizenkét csillagkép van az állatövben? Azért, mert a Nap minden egyes csillagképben egy hónapot tölt, annyi időt tehát, amennyi alatt a Hold a teljes állatövet körbejárja.

A csillagászok egyébként az égbolt többi részét is csillagképekre osztották. Az újkorban, amikor utazásaik során messze délen is tanulmányozni kezdték a csillagokat (olyanokat, amelyeket sohasem láthattak az északi szélességekről, ahol az ókori kultúrák többsége elhelyezkedett), az égnek ezen a részén is csillagképeket jelöltek ki. Manapság az éggömb egésze nyolcvannyolc csillagképre oszlik, de a csillagjósolásban hívó hiszékenyek számára ma is csak a tizenkét állatövi csillagkép az érdekes.

Hipparkhosznak, aki azért nézte éjszakáról éjszakára az eget és követte a bolygók helyzetét, hogy bolygómozgási rendszerét megalkothassa, a bolygók szomszédságában levő állócsillagokat is meg kellett figyelnie. Nagyon valószínű, hogy az égbolt összes fényesebb csillagának a helyzetét megjegyezte, főleg az állatöv csillagképeiben elhelyezkedőket.

A római tudós, *Plinius* (i. sz. 23-79) szerint, aki Hipparkhosz után két évszázaddal írta meg az emberi tudás enciklopédiáját, a csillagkatalógus elkészítésére egy „új csillag” megjelenése ösztönözte a csillagászt, amely az állatöv egyik csillagképében, a Skorpióban bukkant föl.

Elképzelhetjük Hipparkhosz megdöbbenését, amikor egyik éjszakán egy olyan csillagot vesz észre, ami az előző éjjel még nem volt ott.

Megdöbentő? Lehetetlen! Hogy kerülhetne egy új csillag a változatlan, tökéletes mennyboltra?

Hitetlenkedve kellett figyelnie éjszakáról éjszakára az új csillagot, amely fokozatosan elhalványul, végül eltűnik.

Eszébe juthatott, hogy ez a jelenség nem föltétlenül egyedülálló. Talán ismételten megjelentek, majd eltűntek új csillagok, és lehet, hogy mindez észrevétlen maradt. Az emberek ugyanis nemigen vizsgálták a csillagokat, így persze nem is mondhatták meg, ha egy új bukkant föl. Még a csillagászok sem lehettek benne biztosak, hogy valamely objektum valóban új vagy sem, így aztán egy különösebb figyelemre nem méltatott csillag észrevétlenül eltűnhetett.

12

A valódi állócsillagok katalógusának összeállításával Hipparkhosz gyanban megkönnyítette más, későbbi csillagászoknak, hogy fölismerjék az

esetleges újonnan megjelenő csillagokat. Ha egy objektum gyanús, egyszerűen össze kell vetni a táblázattal. A csillagkatalógus-készítés már csak ezért is megéri a fáradságot.

A Hipparkhoszról és új csillagáról szóló mese érdekes, de vajon igaz-e? A történetet elbeszélő Plinius termékeny, kevés józan ítélőképességgel megáldott író volt. Igyekezett mindenről beszámolni, amit csak hallott, így nem tudhatjuk, mennyire megbízhatóak a forrásai. Vajon magának Hipparkhosznak valamelyik, akkoriban még hozzáférhető írásában találkozott vele? Ebben az esetben megbízhatónak kellene tekintenünk. Azonban az is lehet, hogy egy pontatlan, harmadkézből való beszámolóból merített, amelyet egyszerűen érdekesnek talált.

A következő, aki Hipparkhosz új csillagát megemlíti, egy római történész az i. sz. 200-as évekből, aki (két évszázaddal Plinius után) mint „üstökösről” beszél róla.

Ebből azonban nem vonhatunk le messzemenő következtetéseket. Akkoriban ugyanis minden ismeretlen égi objektumot üstökösnek minősítettek (ahogy ma minden ilyesmit UFO-nak hívnak).

Annyi mindenesetre igaz, hogy semelyik fönmaradt görög vagy babiloni följegyzés sem említ egyetlen, nemvárt helyen megjelenő időleges csillagot sem – az egyedüli kivétel ez a Hipparkhoszról szóló homályos mese.

Ma már jól tudjuk, hogy új csillagok igenis meg szoktak jelenni, elég gyakran, sőt néhányuk egészen fényes. Akkor hogyhogy nem számoltak be róluk az ókorban és a középkorban?

Mint említettem, egy új csillagot nehéz észrevenni. Egy alkalmi megfigyelő nem lát mást az égen, mint szanaszét szórt csillagok tömkelegét. Tegyük melléjük néhány éjszakára egy továbbit, akár egy jó fényeset, és senki sem fogja észrevenni, hacsak egy hivatásos csillagász nem. Sőt, még a csillagászok sem veszik föltétlenül észre. Az ókori Babilon és Görögország csillagászaik legnagyobb részét a bolygókat figyelték, valamint az állatövnek azokat a csillagait, amelyek a bolygópozíciók közvetlen közelében helyezkedtek el. Nyugodtan elszalaszthattak egy állatövön kívüli új csillagot. Hipparkhosz is csak azért figyelhetett föl az övére, mert az az egyik állatövi csillagképben volt.

Az pedig, hogy az égi tökéletesség arisztotelészi elképzelése elterjedt, egy további korlátot is jelenthetett. Ha egyszer a csillagászoknak rögeszméjévé vált, hogy az égbolton nincsenek változások, csak nagyon vonakodva lesznek hajlandók valamilyen változásról tudósítani. Félnék majd, hogy nem hisznek nekik, és csorba esik a jóhírükön. Valószínűleg azt dörmögik az orruk alatt, hogy romlik a látásuk, vagy hogy optikai csalódásnak estek áldozatul. Ily módon elkerülhetik azt a kockázatot, ami egy népszerűtlen hír nyilvánosságra hozatalával jár.

13

Egy efféle változás bejelentése egyenesen szentségtörés számba ment volna. A középkori csillagászok, mind a keresztények, mind a muzulmánok, az ég (és különösen a Nap) tökéletességében Isten tökéletességének szimbólumát látták. Bármilyen hibát találni ebben a tökéletességben egyenlő lett volna Isten mesterségbeli tudásának kétségbe vonásával – márpedig ők ennél súlyosabbat elképzelni sem tudtak. Inkább elfogadták, hogy még a Föld is csak azért nem tökéletes, mert Ádám és Éva az Édenkertben evett a tiltott gyümölcsből. Ha őszüleink nem esnek bűnbe, a Föld éppoly tökéletes lenne, mint az ég.

Ezért aztán lehetséges, hogy a csillagászat korai története során ugyan időről időre föltüneztek új csillagok, a csillagászok azonban vagy nem vették észre őket, vagy nem hittek a szemüknek, vagy éppen elővigyázatosan lakatot tettek a szájukra.

A KÍNAIAK „VENDÉGCSILLAGAI”

Csak hogy nem egyedül Európa és a Közel-Kelet a kultúra szülőhazája. Az i. e. 500 és i. sz. 1500 közötti kétezer évben a tudomány és a technika terén Kína messze megelőzte a Nyugatot. Az ókorban és a középkorban a kínai csillagászok állandó megfigyelés alatt tartották az égboltot, és minden szokatlant följegyeztek, bárhol történt is. Őket nem gátolta a tökéletességbe vetett dogmatikus hit, társadalmuk viszonylag világias volt, amelyben a természetfölöttitől való félelem nem korlátozta túlságosan a gondolkodást.

Így például i. e. 134-ben egy üstökös megjelenéséről tudósítottak, ez pedig alátámasztja a római történész beszámolóját arról, hogy mi is lehetett az, amit Hipparkhosz látott.

Biztos, hogy a kínaiak sem tisztán intellektuális okokból tanulmányozták az égboltot. Akárcsak a babiloniakat és a görögöket, őket is az asztrológia érdekelte. Minden égi történésnek valamilyen jelentést tulajdonítottak, és ebből igyekeztek következtetni a különféle jövőbeli földi események valószínűségére.

Mivel az égi előjelek kinyilatkoztatta események gyakran baljóslatúak voltak (egyes csillagászati megfigyelések háborúkat, katasztrófákat, halált jósoltak), a birodalomnak, különösképpen a főnemességnek, sőt magának a császárnak is készen kellett állnia a megfelelő ellenintézkedések megtételére. Ha bármi baj történt, amit nem jeleztek előre, bizony, nem ment ritkaságszámba az udvari csillagászok kivégzése.

Ezért voltak a kínai csillagászok olyan alapos megfigyelők, gondosan följegyezve minden „vendégcsillagot”, minden olyan vendégszereplőt, amely ideiglenesen föllépett az állócsillagok színpadán. Évkönyveikben több mint ötven ilyen új csillagot jegyeztek föl, amelyeket a nyugati csillagászok egytől egyig elszalasztottak. A ki-14

nai tudományt és technikát elsajátító koreai és japán csillagászok szintén följegyeztek néhányat ezek közül.

Az új csillagok némelyike nagyon fényes volt, és fél évig vagy még tovább is látható maradt. Őt ilyen, különösen fényes új csillagról számoltak be az ókor és a középkor folyamán. Így például i. sz. 183-ban egy igen fényes új csillagot észleltek a Kentaur (latinosan: Centaur) csillagképben, i. sz. 393-ban pedig egy kevésbé fényeset a Skorpióban.

Hogy ezekről Európában senki sem adott hírt, azon nincs mit csodálkozni. Ezekben az évszázadokban a görög csillagászat visszaesett, sőt elhalt (Ptolemaiosz után nem akadt egyetlen jelentős görög csillagász sem), a rómaiakat pedig nem érdekelték különösebben a tudományok.

A Skorpió-beli új csillag valószínűleg nem volt fényesebb, mint a Szíriusz (ez az égbolt legfényesebb állócsillaga), és hacsak nem akadt valaki, aki hivatásszerűen figyelte az eget, aki történetesen épp abba az irányba nézett, és aki vagy emlékezett az égboltnak arra a részére, vagy volt csillagkatalógusa, amelyben utánanézhettek – nos, akkor egyáltalán nem meglepő, hogy észrevétlen maradt.

Továbbá, noha az új csillag a Skorpióban (a kínaiak szerint) nyolc hónapig maradt látható, a Szíriusz fényességét csupán néhány éjszakán át érte el. Azután folyamatosan halványult, és minél gyengébb lett, annál kisebb volt a valószínűsége, hogy valaki, akinek kevésbé életbevágó a dolog, mint a kínai csillagászoknak, észrevegye.

A Kentaur-beli i. sz. 183. évi új csillag a kínai beszámolók szerint sokkal fényesebb volt, mint az, amelyik két évszázaddal később a Skorpióban jelent meg. A Kentaur új csillaga hetekig fényesebb lehetett, mint bármi az égbolton, kivéve a Napot és a Holdat. Az ember azt hinné, hogy ezt aztán lehetetlen elszalasztani, csak hogy messze a déli égbolton volt, és ez még egy nagyon fényes objektum esetén is megnöveli a megfigyelés nehézségeit. A kínai lo-jangi obszervatóriumból az új csillagot sosem észlelték 3°-nál magasabban a déli látóhatár fölött.

Ami pedig Európát illeti: teljesen láthatatlan maradt Franciaország, Németország és Olaszország egész területéről, s épp csak hogy látható volt a horizonton Sziciliából vagy Athénből nézve. A délebbre fekvő Alexandriából, a görög tudomány akkori középpontjából azonban tűrhetően lehetett volna észlelni.

Ennek ellenére a görög csillagászok nem számolnak be róla. Ha valaki Alexandriában mégis észrevette a fényes csillagot a déli látóhatáron, az az Arisztotelész nézetei iránti tiszteletből óvakodott attól, hogy ezt hírül adja; vagy ha beszámolt is róla, az ókori tudományos világ egyszerűen nem fogadta el, így a beszámoló nem maradt fenn.

A Skorpió-beli 393. évi csillag után hatszáz éven keresztül nem szerepel jelentős fényerejű új csillag a kínai följegyzésekben. Legközelebb 1006-ból van hírünk egyről a Farkas csillagképben, amely

szomszédos a Kentaurral, így szintén messze a déli égbolton található.

Erősen déli fekvése ellenére mind a kínai, mind a japán csillagászok beszámoltak róla. Nyugaton ekkoriban az arabok voltak a csillagászat legjelesebb művelői, akik épp ekkortájt értek tudományos fejlődésük csúcspontjára. Nos, ők is legalább három helyen említik.

Egyáltalán nem meglepő, hogy ezt az új csillagot ilyen sokan észrevették: a beszámolók egybehangzóan nagy fényességüként írják le. Mai csillagászok becslése szerint legfényesebb stádiumában talán kétszázszorta ragyogóbb volt, mint a Vénusz, és így a telihold fényességének egytizedét is elérhette. Szabad szemmel körülbelül három évig volt látható, bár a Vénusznál fényesebb csak néhány héten át lehetett.

Az új csillag elég magasan volt a déli égbolton ahhoz, hogy látható legyen Dél-Európából, s azt hihetnénk, Olaszország, Spanyolország és Dél-Franciaország lakói félelemmel vegyes csodálattal bámulták éjszakánként a déli égbolton. Nem tették, vagy legalábbis nincs hírünk róla, hogy ezt tették volna. Egy svájci, illetve egy olasz kolostor évkönyve említ valamit ebben az évben, amit fényes csillagként lehet értelmezni, de ez minden.

Mivel 1006-ban jelent meg, nem lenne meglepő, ha az európaiak a világ vége jelének tekintették volna; egyesek akkoriban úgy gondolták, hogy ez a vég körülbelül Jézus születése után ezer évvel várható. De még ez a félelmetes lehetőség sem sarkallt senkit arra, hogy följegyezze.

Aztán 1054-ben (bizonyos, régi ünnepnapokon alapuló számítások szerint július 4-én) egy másik új csillag ragyogott föl, ezúttal a Bika (latin nevén: Taurus) csillagképben, jócskán északra az Egyenlítőtől. Ellentétben a 185. és az 1006. évi, messzi déli új csillagokkal, ez az egész északi féltekéről jól látható volt. Sőt mi több, az állatövben jelent meg, ahol nem lehetett nem észrevenni.

Még hozzá nem csupán olyan fényes volt, mint a Szíriusz, ahogyan ez a 393. évi (szintén állatövi) új csillagról elmondható volt. Ez a mostani a Bikában legalább kétszer-háromszor olyan fényes volt, mint a Vénusz maximális fényereje. Fénye három hétig elég maradt ahhoz, hogy nappal is látni lehessen (már ha valaki tudta, hogy hol keresse), éjjel pedig halvány árnyékot vethetett (akárcsak kedvező feltételek mellett a Vénusz). Csaknem két évig maradt látható szabad szemmel, és valószínűleg fényesebb volt, mint bármelyik új csillag a történelmi időkben, az 1006. évit kivéve.

Hosszú ideig úgy tudtuk, hogy kizárólag a kínai és japán csillagászok számoltak be erről a látványos és könnyen észrevehető égi tüneményről. Úgy látszott, hogy sem az európaiak, sem az arabok nem adtak hírt róla.

Hogyan lehetséges ez? Az új csillagnak 1054 júliusában, amikor a legfényesebb volt, nagyon feltűnőnek kellett lennie a virradat előtti

órákban. Talán minden európai aludt, esetleg erősen borult volt az ég. Vagy, ha a csillag látható volt is, az a pár ember, aki ébren volt és látta, összetévesztette a Vénusszal. Azoknak pedig, akik azt gondolták: „De hát ez nem lehet a Vénusz!”, talán Arisztotelész és az isteni teremtés tökéletessége jutott az eszükbe, és félősen elfordították a tekintetüket.

Az utóbbi években azonban találtak egy arab följegyzést, amely, úgy tűnik, egy fényes új csillagot említ 1054-ben, és előkerült egy olasz kézirat is, amellyel ugyanez a helyzet.

Ez nagy megkönnyebbülést jelent. Közöttünk, akik a nyugati hagyományokon nevelkedtünk, akadhatnak olyanok, akik úgy érzik: ha nincsenek európai beszámolók, akkor az a csillag valójában nem is létezhetett. Könnyebb elhinni azt, hogy yalami távoli idegenek fantáziáltak, mint azt, hogy az európaiak nem látták, ami az orruk előtt volt. Ámbár, ahogy később majd kifejtem, még ha nyugati beszámolók nem lettek volna, akkor is szilárd bizonyítékunk lenne arra, hogy a kínai és japán csillagászok följegyzései megbízhatóak.

1181-ben a kínai és japán csillagászok ismét egy új csillagot jeleztek, ez alkalommal a Kassziopeia csillagképben, amely az egész északi féltekén világosan látható volt. Fényessége viszont csak akkorára növekedett, mint a Végáé (ez a második legfényesebb csillag az északi égbolton), és Európában észrevétlen maradt.

Ezután négy évszázadon keresztül nem észleltek új csillagot. Amikorra a következő föltűnt, a körülmények már egészen megváltoztak. A kínai és japán csillagászok ugyanolyan ügyesek voltak, mint régen, csak hogy közben Európában is megtörtént az újjászületés. Most az európai tudomány vezette a mezőnyt.

AZ ELSŐ NÓVA

Nikolausz Kopernikus (1473-1543) lengyel csillagász 1543-ban adta ki azt a könyvet, amelyben a bolygók helyzetének előrejelzéséhez szükséges matematikát írta le. Ebben föltételezte, hogy a Föld a Merkurral, a Vénusszal, a Marssal, a Jupiterrel és a Szaturnusszal együtt a Nap körül kering. (A Holdat továbbra is úgy tekintette, mint ami a Föld körül kering.) Ez a föltevés jócskán leegyszerűsítette a dolgot, és minden addiginál használhatóbb bolygótáblázatokat eredményezett, noha Kopernikus még ragaszkodott ahhoz, hogy a bolygók körpályák kombinációján mozognak.

A könyv, amely Kopernikus élete végén jelent meg (állítólag a frissen kinyomtatott példányt halálos ágyán adták a kezébe), éles vitát váltott ki. Nagyon kevesen akarták elhinni, hogy a hatalmas és súlyos Föld irdatlan sebességgel száguld az űrben, hiszen ezt a mozgást egyáltalán nem lehetett érezkelni. Legalább fél évszázad telt el, mire a csillagászok elfogadták ezt a

jóllehet időközben Hipparkhosz és Ptolemaiosz világképe alaposan megrendült.

Kopernikusz könyvének megjelenése után három évvel született Svédország legdélibb tartományában, amely akkor Dániához tartozott, *Tycho Brahe* (1546-1601). Először jogot tanult, de tizennégy éves korában megfigyelt egy napfogyatkozást, és ez (önmaga és az asztronómia szerencséjére) a csillagászat felé fordította érdeklődését.

A nagy alkalom 1572-ben érkezett el számára, amikor huszonhat éves volt, és még senki sem hallott róla Európában.

Mindaddig az európaiak (a csillagászokat sem kivéve) semmit sem tudtak az új csillagokról. A Hipparkhosz új csillagáról szóló megbízhatatlan történetet egyszerűen figyelmen kívül lehetett hagyni, mint afféle ókori mesét, hiszen Ptolemaiosz sehol sem említi. Az a néhány utalás, amely egy vagy két nyugati krónikában az 1006. és 1054. évi új csillagokkal kapcsolatban szerepel, annyira homályos, hogy az 1500-as évek csillagászaik nem is tudhattak róla.

És persze azt is biztosra vehetjük, hogy egyetlen európai csillagász sem hallott a kínaiak, koreaiak, japánok által összegyűjtött följegyzésekről.

1572. november 11-én aztán Tycho Brahe, nagybátyja kémiai laboratóriumából kísértélva, egy olyan új csillagot vett észre, amelyet azelőtt sosem látott. A Kassziopéiában volt, magasan az égen, és fényesebben ragyogott, mint a jól ismert csillagkép bármelyik tagja. Ha valaki úgy ismerte a csillagtérképet, mint Tycho, annak számára semmiképp sem maradhatott észrevétlen.

Akárcsak az 1054. évi, a Kassziopéia új csillaga is jóval fényesebb volt a Vénusz maximális fényességénél. Egyetlen csillagász sem téveszthette össze vele, mert messze kívül esett az állatövi csillagképek sávján, távol minden olyan helytől, amelyen bolygó valaha is tartózkodott.

Rendkívüli izgatottságában Tycho minden arra járót megkért, nézze meg a csillagot, hátha valaki meg tudja mondani, hogy ott volt-e előző éjjel is.

A megkérdezettek mind azt mondták, hogy látják az új csillagot, Tycho látásával tehát nem volt baj. Arra viszont egyikük sem tudott válaszolni, hogy ez egy új csillag vagy sem, illetve ha az, akkor mikor jelent meg először. Fényesen ragyogott, de bárki azt mondhatta volna, hogy életének akár minden éjszakáján ott lehetett már.

Tycho azonban meg volt győződve, hogy semmi hasonló nem volt az égen, amikor utoljára látta. De amíg nagybátyja laboratóriumában kémiai kísérletekkel foglalatzkodott, egy időre felhagyott az égbolt megfigyelésével. Nem esküdhetett meg rá, hogy ez a csillag nem volt ott már a múlt éjjel, vagy akár számos, azt megelőző éjszakán. (Érdekes, hogy egy német csillagász, *Wolfgang Schuler* már november 6-án, virradat előtt észrevette az új csillagot, öt nappal korábban tehát, mint ahogy Tycho látta.)

Tycho most valami olyat tett, amit csillagász addig soha: módszer-

res éjjeli megfigyeléssorozatba fogott. Korábbi németországi tartózkodása alatt néhány kitűnő eszközt készített, és most azonnal használatba vette az egyiket. Ez egy nagy *szeptans* volt, amellyel megmérte az új csillag és a Kassziopéia többi csillagának szögtávolságát. Műszereit gondosan hitelesítette, hogy a megépítésük közben elkövetett bármilyen hibát korrigálhassa, és a légköri fénytörést is figyelembe vette (ő volt az első csillagász, aki ezeket megtette). Minden megfigyelését és azok összes körülményeit pontosan följegyezte.

Távcsőve nem volt, hiszen azt csak harminchat évvel később fedezik majd föl, mégis tekintélyt szerzett magának mint a csillagászat történetének legjobb távcső-előtti megfigyelője. Való igaz, az új csillaggal kapcsolatos megfigyelései mindennél, talán még Kopernikusz új elméleténél is jobban jelezték a modern csillagászat hajnalát.

Az új csillag a Sarkcsillag közvetlen közelében volt, így olyan kis körökben került meg azt, hogy sosem bukott a látóhatár alá, mindig az égen maradt. Ezért Tycho Brahe az éjszaka bármely órájában megfigyelhette. És elképedve vette észre: olyan fényesen ragyog, hogy még nappal is látható.

Azonban elég rövid ideig maradt ilyen fényes; éjszakáról éjszakára halványabb lett. 1572 decemberében már nem volt fényesebb, mint a Jupiter, 1573 februárjától alig volt látható, és 1574 márciusában eltűnt. Tycho megfigyelései szerint 485 napig volt az égen. A kínai és koreai csillagászok is észlelték az új csillagot, de nem mérték meg olyan pontosan a helyzetét, mint ő. Kezdték lemaradni az európaiak mögött.

Mi volt ez az új csillag? Légköri jelenség, aminek lennie kellett, ha az ég tökéletességébe és változatlanságába vetett arisztotelészi hit helytálló? De helyén maradhat-e 485 napig egy légköri jelenség –még hozzá pontosan ugyanazon a helyen, hiszen Tycho gondos mérései sem tudtak egész idő alatt semmilyen mérhető elmozdulást megállapítani a csillagkép többi csillagához képest!

Tycho megpróbálta közvetlenül meghatározni a távolságát. Ez az égitest *parallaxisának* mérésével oldható meg – vagyis azt kell megnézni, hogyan változik a látszólagos helyzete más, távolabbi testekhez képest, ha különböző helyekről nézzük.

A Holdnak, a hozzánk legközelebbi égitestnek kicsi ugyan a parallaxisa, mégis elég nagy ahhoz, hogy távcső nélkül meg lehessen mérni. Azt Hipparkhosz óta tudták, hogy távolsága a Föld átmérőjének a harmincszorosa, így a Hold mai hosszúságegységben kifejezve körülbelül 380 000 kilométerre van a Földtől.

Bárminek, aminek a Holdénál kisebb a parallaxisa, távolabb kell lennie tőlünk, és az égbolthoz kell tartoznia. Az új csillagnak olyan kicsi volt a parallaxisa, hogy Tycho minden erőfeszítése ellenére egyáltalán nem volt mérhető. Ezért nem lehetett légköri jelenség: ugyanolyan csillag volt, mint bármely másik.

Tycho ezt annyira fontosnak tartotta, hogy hosszas habozás után elhatározta: könyvet ír róla. Tycho Brahe nemesembernek tekintette

magát, és abban az időben egy nemes nem ereszkedhetett le odáig, hogy alacsonyabbrangú halandóknak magyarázzon. Csak fölfedezésének óriási jelentősége vitte rá, hogy mégis ezt tegye.

1573-ban megjelent könyvét, mint tudományos műveknél szokás volt, latinul írta. Nagyalakú könyv volt, de nem valami hosszú; mindössze ötvenkét oldal. Meglehetősen tekervényes címének többnyire a rövidített változatát emlegetik: *De Nova Stella* (Az új csillagról).

A könyv sok mindent tartalmazott az új csillag asztrológiai jelentőségéről, mivel Tycho, korának legtöbb csillagászához hasonlóan, szilárdan hitt a csillagjósolásban. Túl az asztrológián, Tycho leírta az új csillag fényességét, valamint azt, hogy hogyan halványult hétről hétre. Megadta a helyzetméréseit, és a környező csillagokat ábrázoló rajzon bejelölte az új csillag helyét, úgyhogy az emberek pontosan el tudták képzelni, mit is látott.

S ami a legfontosabb: elmagyarázta, hogy a csillag helyzete sosem változott, és hogy nem volt mérhető parallaxisa. Csillag volt tehát, egy új csillag. Az égbolton valami letagadhatatlan változás ment végbe.

A könyv szenzációt keltett, hiszen ez a görög csillagászat végét jelentette. Bármiféle, az égbolt állandóságát és tökéletességét yalló elképzelést a sutba kellett dobni. S valóban, 1577-ben ragyogó üstökös tűnt föl, amely mozgott a csillagokhoz képest, de Tycho kimutatta, hogy ennek sincs parallaxisa. Így kiderült, hogy még az üstökösök is távolabb vannak, mint a Hold, tehát égi, nem pedig légköri jelenségek.

Amint a könyv megjelent, Tycho Brahe egy csapásra Európa leghíresebb csillagásza lett. A címben szereplő „nova” (jelentése: „új”) szó pedig elkezdtek használni az új csillag és minden további új csillag megnevezésére. Ettől fogva nevezük az égbolt új csillagait *nóváknak*.

A „nova” többes száma a latinban „novae”, és Tycho után hosszú ideig valóban így is használták. Manapság azonban egyre kevesebben vagyunk latinos műveltségűek, ez az oka, hogy a „nóva” többes számát már majdnem mindig „nóvák”-ként képzik. (Pedáns lelkemet kissé sérti is, hogy így járok el, de többes számként magam is a „nóvák” alakot fogom használni ebben a könyvben.)

TOVÁBBI NÓVÁK

Tycho nóvájának az lett az egyik következménye, hogy sok csillagász (ahelyett, hogy továbbra is a bolygókra összpontosított volna) alaposabban vizsgálni kezdte a csillagokat. Egy nóva fölfedezése nyilvánvalóan bárkit híressé tehetett, így egyetlen emberöltő alatt kiderült, hogy az állócsillagok körében egyáltalán nem is olyan ritkák a változások.

1596-ban Tycho egyik barátja, *David Fabricius* (1564-1617) német csillagász a Cet (latinosan: Cetus) csillagképben azonosított egy csillagot, amely korábban nem volt ott. Hármás magnitúdójú, tehát csak közepes fényességű csillag volt. De a csillagászok többé már nem hagyták, hogy bármi is túljárjon az eszükön.

Tényleg új csillagról van szó? Ezt nem volt nehéz eldönteni, csak folytatni kellett a megfigyelését. Idővel az új csillag elhalványult, majd eltűnt. Fabricius pedig annyira biztos volt a dolgában, hogy egy közleményben hírül adta: valóban nóvát fedezett föl.

A következő nóvával *Johannes Kepler* (1571-1630) német csillagász is kapcsolatba került.

Kepler Tychónál dolgozott mestere utolsó éveiben. Tycho sok évet töltött a Mars mozgásának gondos mérésével, remélve, hogy ezeket a megfigyeléseket föl tudja használni a bolygópályákkal kapcsolatos kompromisszumos álláspontjának igazolására. Meg akarta mutatni, hogy a Merkúr, a Vénusz, a Mars, a Jupiter és a Szaturnusz mind a Nap körül, a Nap viszont bolygóival együtt a Föld körül kering.

Amikor Tycho 1601-ben meghalt, összes följegyzését Keplerre hagyta, abban a reményben, hogy asszisztense ezekkel fogja megalapozni a „Tycho-féle rendszer” bizonyítását.

Ezt azonban Kepler természetesen nem tudta igazolni. Amit 1609-ben igazolt, az az volt, hogy a Mars nem egy körön, nem is körök valamilyen kombinációján mozog a Nap körül, ahogy Platón bizonygatta, és ahogy minden későbbi nyugati csillagász (Kopernikust is beleértve) feltételezte. Ehelyett a Mars egy olyan ellipszispályán halad, amelynek a Nap van az egyik fókuszában. Továbbmenve Kepler kimutatta, hogy valamennyi bolygó pályája ellipszis alakú.

Ezzel Kepler végre megadta a Naprendszer helyes leírását. Az ő rendszere, nem pedig Kopernikuszé fedi a valóságot. Az ezt követő majdnem négy évszázadban a csillagászok nem változtattak alapvetően Kepler elméletén. Teljesebb elméleteket dolgoztak ugyan ki, újabb bolygókat fedeztek föl, de az ellipszispályák megmaradtak, és egészen biztosan meg is fognak maradni.

1604-ben, még mielőtt Kepler teljesen kidolgozta volna rendszerét, egy új csillag lángolt fel a Kígyótartó (latin nevén: Ophiuchus) csillagképben. Fényesebb volt, mint Fabricius nóvája, de közel sem olyan ragyogó, mint a Tychóé. Az 1604. évi nóva körülbelül olyan fényes volt, mint a Jupiter, és talán ötöd olyan fényes, mint a Vénusz maximális fényessége.

Mégis meglepő látvány volt az égen, amelyet addigra már teljes egészében átkutattak a csillagászok. Kepler is, Fabricius is hétről hétre gondosan mérte az 1604. évi nóva helyzetét és változásait. Ez egy teljes évig tartott, mielőtt eltűnt volna.

Igy az 1572 és 1604 közötti, egyetlen emberöltőt alig meghaladó harminckét év alatt három nóvát figyeltek meg, amelyek közül kettő eléggé fényes volt. Mind a három látványos tűnemény volt, ha nem is annyira ritkák, mint ahogy megfigyelőik képzelték.

Változékony csillagok

LÁTJUK A LÁTHATATLANT!

1604-ben, amikor Kepler nívója fölűnt, a csillagokról nagyjából ugyanaz a kép élt az emberek fejében, mint hajdan: az eget még mindig valamilyen szilárd anyagból készült gömbhéjnak hitték, s a csillagok nem voltak egyebek, mint az égboltra erősített, ragyogó

gyöngyszemek.

Néha valamilyen ismeretlen erő egy apró, fénylő kiáramlást (egy nívát) helyezett az égboltra. Ezek az új fényes jelek fölűillantak, de mindig ki is hunytak. Minél fényesebben ragyogtak, annál később lobbantak el, de előbb vagy utóbb mind eltűntek.

Lehetséges, hogy ha egyszer egy nívó elhalványult, azért még tovább létezik, csak épp túl gyöngye a fénye ahhoz, hogy az emberi szem észrevegye? Továbbmenve: lehet, hogy vannak csillagok, amelyek mindig túl halványak ahhoz, hogy láthassuk őket? Lehetnek csillagok, amelyek a világegyetem kezdetétől fogva léteznek, de állandóan túl halványak voltak ahhoz, hogy láthatóak legyenek, ezért sohasem észleltük őket?

Voltak tudósok, akik így gondolták. *Nicolaus Cusanus* (1401-1464) német pap szerint a végtelen térben végtelen számú csillag van szétszórva; valójában minden csillag egy-egy Nap, és csak azért tűnnek halvány fénypontoknak (ha egyáltalán látszanak), mivel óriási messzeségben vannak; minden csillag körül bolygók keringenek, s legalább ezek némelyikén értelmes lények laknak. Ha pedig végtelen számú csillag van, és az ember csak néhány ezret lát, akkor nagy többségük túl halvány ahhoz, hogy észrevegyük őket.

Cusanus nézetei nagyon moderneknek tűnnek, és sejtelmünk sincs, hogyan jutott el hozzájuk. Meghökkenítő nézeteinek igaz voltáról nem is tudott meggyőzni másokat, mivel semmilyen megfigyelési bizonyítékkal sem támaszthatta alá azokat.

Egy olasz tudós, *Giordano Bruno* (1548-1600) volt az, aki másfél évszázad múltán elfogadta Cusanus elképzeléseit. Addigra azonban már végbement a protestáns reformáció, az egyházi emberek Európa-szerte gyanakvókká és bizalmatlanokká váltak, és sokkal veszélyesebb lett a szokatlanul hangzó

gondolatok mellett kiállni. Ráadásul Bruno makacsul ragaszkodott a véleményéhez, mint aki egyenesen élvezte, ha megdöbbenhet és megbotrántkozathat másokat. Végül is máglyahalál lett a sorsa.

Bizonyítéka Brunónak sem volt az elképzeléseire. Megégetése idején szinte senki sem hitt olyan csillagok létezésében, amelyek túl halványak ahhoz, hogy láthatók legyenek. Végül is miért kellene láthatatlan csillagoknak létezniük? Miért teremtett volna Isten ilyeneket? Valóságos szentségtörés volt azt állítani, hogy Isten bármilyen haszontalan dolgot teremthetett.

1609-ben egy másik olasz tudós, *Galileo Galileinek* (1564-1642) tudomására jutott, hogy Hollandiában egy mindkét végén lencsékkel ellátott csövet találtak föl, amely nagyobbaknak és közelebbieknek mutatja a tárgyakat. Azonnal kísérletezni kezdett, és hamarosan el is készült azzal, amit ma *távcsőként* ismerünk, s valami új és merész dolgot követett el vele: az égre irányította.

Galilei távcsöve ugyan kicsi volt és kezdetleges, mégis, ez volt az első alkalom, hogy valaki nem pusztán szabad szemmel pásztázta végig az éjszakai égboltot. A távcső több fényt gyűjt össze, mint amennyire a szem önmagában képes, és ezt a megnövekedett fény mennyiséget a retinánkra vetíti. Ennek következtében mindent nagyobbaknak vagy fényesebbnek, esetleg mindkettőnek látunk. Nagyobb a Hold, és több részlet válik rajta kivehetővé. Ugyanez a helyzet a Nappal is – már ha megtesszük a kellő óvintézkedéseket a vakító fényerő ellen. A bolygók nagyobbaknak látszanak, kis fénykörökké válnak. A csillagok annyira aprók, hogy még ha nagyobbaknak mutatkoznak is, ahhoz még mindig nem elég nagyok, hogy ne csupán mint fénypontok jelenjenek meg – de ezek a fénypontok legalább fényesebbek lesznek.

Távcsövével Galilei, amerre csak nézett, új meg új csodákat látott. A Holdon hegyeket és krátereket észlelt, valamint olyan sík vidékeket, amelyeket tengereknek vélt. Foltokat talált a Napban. Négy kísérőt látott a Jupiter körül keringeni. Azt tapasztalta, hogy a Vénusz ugyanúgy fázisváltozásokon megy át, mint a Hold. A távcsőben látottak alapján nagyon valószínűnek tűnt, hogy a bolygók ugyanolyan égitestek, mint a Föld, s talán éppoly változóak és éppoly kevésbé tökéletesek. Még a Nap is, újonnan fölfedezett foltjaival, tagadhatatlanul tökéletlennek bizonyult. Ami pedig a Vénuszt illeti: fázisai a ptolemaioszi rendszerben nem fordulhattak elő a Galilei megfigyelte formában, a kopernikuszi rendszerben viszont lehetségesek voltak.

Galilei távcsöve határozottan alátámasztotta a Naprendszer heliocentrikus szemléletét, ez viszont bajba sodorta őt az Inkvizíciónál, amely arra kényszerítette, hogy tagadja meg a kopernikuszi eszmét. A konzervatív vallásos erőkön azonban ez sem segített, hiszen hamarosan az egész tudományos Európa magáévá tette mind Kopernikusz állítását, amely szerint a Nap áll a bolygórendszer középpontjában, mind pedig Kepler ellipsziseit.

Ám Galilei legelső távcsöves fölfedezése nem a Naprendszerrel volt kapcsolatos. Amikor első ízben az égre nézett, távcsövét a Tejútá irányította, és azt találta, hogy az nem egyszerűen egy fényes köd, hanem hihetetlen sokaságú csillagból áll, amelyek szabad szemmel nem láthatók külön-külön. Bármerre nézett az égen, távcsöye minden irányban sokkal több csillagot mutatott, mint amikor pusztá szemmel nézte.

Kiderült, hogy rengeteg olyan csillag van, amely túl halvány ahhoz, hogy szabad szemmel észrevehető legyen, de rögtön látható lesz, amint a távcső eléggé megnöveli a fényességét.

Ezek szerint ha egy nőya elhalványul és eltűnni látszik, akkor egyáltalán nem biztos, hogy valóban eltűnt. Esetleg csak túl halvánnyá vált ahhoz, hogy pusztá szemmel megfigyelhető legyen. Talán a nőva a valóságban egyáltalán nem „új” csillag — talán egyszerűen olyan csillag, amely túl halvány volt ahhoz, hogy a szokott módon észrevegyük, azután hirtelen fölfénylett, láthatóvá lett, majd megint elhalványult, és újra láthatatlanná vált.

J. F. Holwarda (1618-1651) holland csillagász 1638-ban észrevett egy csillagot az égboltnak pontosan azon a részén, ahol negyvenkét évvel azelőtt Fabricius nővája volt látható. Holwarda megfigyelte, amint elhalványul, egy időre eltűnik, majd újra visszatér. Kiderült, hogy a fényessége körülbelül tizenegy havonként növekszik és csökken; távcsővel viszont még akkor is látható, amikor a leghalványabb. Minimális fényessége 9 magnitúdó volt (az éppen hogy látható csillagokét 6 magnitúdónak véve és Hipparkhosz beosztását tovább folytatva a távcsővel észlelhető legkisebb fényesség-értékekig).

Fabricius csillagának legerősebb fényessége körülbelül kétszázötvenszer volt nagyobb, mint a leggyöngébb. Szigorú értelemben véve nem volt nőva, nem volt „új” csillag. Am így is segített megdönteni az ég változatlanságáról alkotott elképzelést. Egy változékony csillag, amely változtatja a fényerejét, ugyanúgy ellentétben áll az állandóság arisztotelészi dogmájával, mint egy nőva.

A változó fényességű csillagokat ma *változócsillagoknak* nevezzük, és Holwarda volt az első, aki egy ilyet azonosított. Mindazonáltal a hirtelen-váratlan, szabálytalanul fölfénylő változócsillagoknak továbbra is *nőva* maradt a neyük, bár ez annyit tesz: „új”. Fabricius csillagát viszont, amely szabályos időközönként lett fényesebb, illetve halványabb, nem tekintették többé nővának — ez egyszerűen egy változócsillag volt.

Johann Bayer (1572-1625) német csillagász 1603-ban kidolgozott egy rendszert, amelyben minden csillagot egy görög betű és annak a csillagképnek a neve jelöli, amelybe tartozik. Fabricius csillagának az Omikron Ceti („a Cet omikronja”) nevet adta, amikor a helyzetét egy észlelhető fázisában meghatározta. (Arra nem jött rá, hogy ez volt az a „nőva”, amelyről Fabricius beszámolt.) Miután változékony természetét fölismerték, *Johannes Hevelius* (1611-1687) német csillagász „Mirá”-nak nevezte el, ami a latinban „csodálatost” jelent.

A Mira valóban csodálatot kelthetett, hiszen fölfedezése idején a változékonyosság nagyon furcsa, szokatlan dolog volt — ám ez nem sokáig maradt így. Mielőtt a XVII. század véget ért, további három változócsillagot fedeztek föl. Ezek egyike egy nagyon jól ismert csillag, az Algol volt, a Perzeusz csillagkép második legfényesebb tagja, amelyet ezért Béta Perseinek is neveznek.

1667-ben *Geminiano Montanari* (1633-1687) olasz csillagász észrevette, hogy az Algolnak változó a fényereje. Ez mégsem egy Mira, mivel a változás nem olyan nagymértékű. Az Algol legnagyobb, illetve legkisebb fényessége 2,2, illetve 3,5 magnitúdó; legfényesebb fázisában tehát körülbelül háromszor olyan erősen világít, mint a leghalványabbban.

Lehetséges, hogy erre az arabok már korábban fölfigyeltek. Perzeuszt, a mitikus hőst általában a Medúza frissen levágott fejével a kezében ábrázolták. A Medúza fejét (ez egy olyan irtózatosszörny, amelynek pusztá látása kővé változtatja az embert) az Algol csillag képviselte. Ez a név az araboktól származik, és „vámprít” vagy „démon” jelent. Azért vajon, mert a Medúzát jelképezte, vagy azért, mert változtatta a fényerejét, és e tekintetben dacolni látszott az ég változhatatlanságának szentesített elképzelésével? Vajon maguk a görögök is kénytelen-kelletlen tudomásul vették a változás tényét, és ezért tették meg a csillagot a Medúza jelképének?

1782-ben egy tizenhét éves, süketnéma angol fiatalember, *John Goodricke* (1764-1786) alaposan megfigyelte az Algolt, és rájött, hogy a fényváltozás tökéletesen szabályos. A fölfénylő-elhalványuló ciklus pontosan hatvankilenc óráig tart. Goodricke fölvetette, hogy az Algol esetleg egy kettőscsillag, amelynek egyik tagja sokkal halványabb, mint a másik. A kettő egymás körül kering, és a halványabb hatvankilenc óránként fényesebb társa elé kerül, így az Algol fénye egy időre elhalványul. Mint kiderült, igaza volt, ma pedig már körülbelül kétszáz ilyen *fedési változót* ismerünk.

Az Algol tehát nem valódi változó, hiszen a csillagpár mindkét tagja tökéletes állandósággal világít, és egyáltalán nem is látszana változónak, ha az egyik csillag nem kerülne periodikusan a másik elé.

Goodricke 1784-ben fölfedezte, hogy a Cefeusz (latinon: Cepheus) csillagkép egyik csillaga, a Delta Cephei szintén változó. Fényereje még kisebb mértékben ingadozik, mint az Algolé, lévén maximuma csak kétszer akkora, mint a minimuma. A Delta Cephei periódusa ugyancsak nagyon szabályos: minden 53 napon válik fényesebbé, illetve halványabbá. Ez azonban nem olyan módon megy végbe, amit egy föltételezett fedéssel könnyedén meg lehetne magyarázni. Sokkal lassabban halványul el, mint ahogy kifényesedik, holott a fedési változók esetében a kettőnek azonos sebességgel kell végbemennie.

Az utóbbi két évszázadban számos további változócsillagot fedeztek föl, amelyek fényváltozási görbéi hasonlóak a Delta Cepheiéhez,

periódusidejük pedig kettő és negyvenöt nap közé esik. Ezeket *cefeida változóknak* nevezzük. Csak az 1920-as években tudta *Arthur Stanley Eddington* (1882-1944) angol csillagász kimutatni: a görbe megmagyarázható azzal a föltevessel, hogy a csillag lüktet – azaz mérete szabályosan megnagyobbodik, majd összehúzódik.

A változócsillagok többsége ilyen *pulzáló változó*; egyesek rövid, mások hosszú periódusúak, némelyik szabályos, a többi szabálytalan. Ma már több ezer ilyen ismerünk.

A nóvákat szintén a változócsillagok közé soroljuk, mivel fényességük időben változik. Megkülönböztető jegyük az, hogy a változás itt sokkal nagyobb mérvű, mint a többi változócsillag esetében. A nóvák fényessége tízezerszeresére, s nem csupán két-háromszorosára nő. Továbbá sokkal hosszabb idő alatt és nagyobb mértékben halványulnak el. Sőt, az egyéb változócsillagok ciklikusak: rövid időközökben újra és újra fényesebbé, illetve halványabbá válnak. A nóvák fényváltozása viszont egyszeri. Ha a fölfénylés epizódja meg is ismétlődik, az akkor is hosszú és teljesen kiszámíthatatlan időközökben történik.

MOZGÁS ÉS TÁVOLSÁG

A Tycho és Kepler által megfigyelt látványos nóvák, illetve az ég változó természetének tudomásulvétele után másfél évszázad telt el anélkül, hogy egyetlen új nóvát jeleztek volna. Még Fabricius csillagáról is, amit ő annak hitt, végül is kiderült, hogy nem nóva volt.

Mondanunk sem kell, nem a nóvák fogytak el. Épp csak hogy egyik sem volt szembetűnő, és így egyiket sem vették észre. Bár mind többen és többen fürkészték az eget, egyszerűen nem volt elegendő csillagász ahhoz, hogy az éjszakai égbolt minden darabkáját kellő alaposan megvizsgálják, s az új távcsövek jóvoltából láthatóvá lett közönséges csillagok tömkelegében fölfigyeljenek egy nem túl látványos nóvára. Még ma is, amikor pedig kitűnő csillagkatalógusok és fejlett fényképészeti technika áll a csillagászok rendelkezésére, előfordul, hogy eleinte elszalasztják a nóvákat, és csak akkor veszik észre őket, amikor már túl vannak a kezdeti csúcspontjukon. Sőt, egy-egy nóva akár teljesen észrevétlen maradhat mindaddig, amíg a jóval korábban készült fényképeket részletesen át nem vizsgálják.

Mindazonáltal ez a másfél évszázad, amelyben egyetlen nóvát sem jeleztek, nem volt híján jelentős előrehaladásnak a csillagok vizsgálatában.

Száz évvel a távcsövek használatba vétele után még mindig lehetséges volt azt hinni, hogy az ég egy szilárd gömbhéj a Szaturnusz pályáján kívül (akárcsak az ókorban, 1700-ban is ez volt a legtávolabbi ismert bolygó), a csillagok pedig hozzárögzített, apró fénylő pontok. Ezeknek a pontocskáknak a számát a távcső ugyan óriási

mértékben megsokszorozta, de a hatalmas égbolton mindegyiküknek jutott hely.

Edmond Halley (1656-1742) angol csillagász jött rá elsőnek, hogy az üstökösök állandó pályán mozognak a Nap körül, és periodikusan visszatérnek. Azt az üstökösöt, amelyet tanulmányozott, azóta Halley-üstökösnek hívjuk.

A későbbi években Halleyt az foglalkoztatta, miképp lehet a különböző csillagok pontos helyzetét megállapítani. Ahogy a távcső tökéletesedett, úgy javult a pontosság is.

Összevetve eredményeit a régebbiekkal, meglepődve látta, hogy a görögök, úgy látszik, rosszul állapították meg egyes csillagok helyzetét. A görögöknek persze nem volt távcsövéjük, de a csillagpozíciók pontatlansága még ezt beszámítva is föltűnően nagy volt – különösen, mivel csak a fényesebb csillagok némelyike volt rossz helyen.

Halley egyetlen következtetést tartott lehetségesnek: nem a görögök tévedtek, a csillagok mozdultak el helyükről az azóta eltelt tizenhat évszázad folyamán. 1718-ban közzétette, hogy a fényes csillagok, a Szíriusz, a Procyon és az Arkturusz mind észrevehetően elmozdultak a görögség kora óta, sőt némileg már azóta is, hogy Tycho másfél évszázaddal azelőtt följegyezte hosszúsági és szélességi adataikat.

Halley szerint a csillagok egyáltalán nincsenek rögzítve, hanem óriási távolságokat barangolnak be összevissza az űrben, akárcsak a méhek a rajban. Am olyan távol vannak a Földtől, hogy az általuk megtett távolság ehhez képest kicsiny, így éjszakáról éjszakára, sőt évről évre sem lehetett észlelni a mozgásukat – egészen addig, amíg a távcsövek nem váltak elég finomakká a rendkívül kicsiny helyzetváltozások méréséhez.

Ha azonban a pozíciókat emberöltőkön, sőt évszázadokon át figyelemmel kísérik, akkor az eltolódások észrevehetőkké válnak, különösen a közelebbi csillagok esetében. A Szíriusz, a Procyon és az Arkturusz ezek közé a közelebbi csillagok közé kell tartozniuk, vélte Halley, és mind fényességük, mind szembeszökő *sajátmozgásuk* ennek tulajdonítható.

De milyen távol vannak a csillagok? Ezt megmondhatjuk, ha meg tudjuk határozni néhányuk parallaxisát. Egy közelebbi csillagnak valamelyik sokkal távolabbihoz viszonyított helyzete látszólag megváltozik, miközben a Föld a Nap körül keringve a Nap egyik oldaláról mintegy 300 millió kilométerrel arrébb átkerül a túloldalra. Csakhogy ez a látszólagos mozgás még a legközelebbi csillagok esetében is olyan kicsi, hogy a távcsövek nemhogy Halley idejében, de még egy évszázaddal később sem voltak eléggé érzékenyek egy csillag parallaxisának észleléséhez.

Csak 1838-ban sikerült *Friedrich Wilhelm Bessel* (1784-1846) német csillagásznak megmérnie a 61 Cygni nevű csillag kicsiny parallaxisát. Valójában ez egy egymás körül keringő csillagpár a Hattyú (latin nevén: Cygnus) csillagképben. A csillagpár együttvéve sem

különösebben fényes, de tagjai szokatlanul nagy sajátmozgással rendelkeznek, ezért választotta ezt Bessel tanulmányozás céljára. Kiderült, hogy 106 billió kilométerre van a Földtől. A fény 9,46 billió kilométert tesz meg egy év alatt, ez a távolság a *fényév*. A 61 Cygni tehát 11,2 fényév távolságra van tőlünk.

Körülbelül ugyanakkor, amikor Bessel véghezvitte ezt a bravúrt, *Thomas Henderson* (1798-1844) skót csillagász megmérte az Alfa Centauri távolságát, és azt körülbelül 4,3 fényévnek találta. Az Alfa Centauri (egy egymás körül keringő csillagpár, valamivel távolabb egy harmadikkal) a Földhöz legközelebb lévő ismert csillag.

A csillagászok egyre inkább a *parszeket* használják távolságegységként, ami 3,26 fényévvel vagy 31 billió kilométerrel egyenlő. Az Alfa Centauri így 1,3 parszekre, a 61 Cygni pedig körülbelül 3,4 parszekre van tőlünk.

Más szóval: a csillagok épp olyanoknak bizonyultak, amilyeneknek négy évszázaddal korábban Cusanus gondolta őket. Ha nem is végtelenül sokan, de nyilvánvalóan hatalmas számban léteznek. És a csillagok mindegyike egy-egy Nap, mind elképzelhetetlenül meszsze, szétszórva az űr hatalmas tartományaiban.

A kép, amelyet az ember az égről alkotott, visszavonhatatlanul megváltozott. Az ókori csillagászatból jóformán semmi sem maradt.

NÓVÁK AZ ÚJKORBAN

1838-ban Dél-Afrikában *John Herschel* (1792-1871) angol csillagász az éggömb déli pólusa körül elhelyezkedő csillagokat tanulmányozta, amelyek sohasem láthatók az európai szélességekről. Eközben a Hajógerinc (latin nevén: Carina) csillagképben egy fényes, 1-es magnitúdójú csillagot vett észre, amely Éta Carinae néven volt ismert. Azok a csillagászok, akik korábban a déli féltekén jártak, csak gyöngé, 4-es magnitúdójú csillagként tettek róla említést.

Nóva lett volna? Annak tűnt. Ahogy az évek múltak, lassan elhalványodott, de aztán 1843-ban ismét fölragyogott, és rövid időre elérte a — 1-es magnitúdót, csaknem olyan fényessé yálva, mint a Szíriusz. Azután fokozatosan elhalványult, egészen 6-os magnitúdóig. Nem valódi nóva volt ez, inkább egy szokatlan típusú, nagyon szabálytalan változó (az ilyenekre még majd visszatérünk).

A távcső fölhasználása utáni első, vitathatatlan nóvát 1848-ban figyelte meg a Kigyótartó csillagképben *John Russell Hind* (1823-1895) angol csillagász. Ugyanabban a csillagképben volt ez is, mint amelyikben Kepler nóvája, de a helyzete határozottan más volt, így nem lehetett a korábbi nóva újabb föllobbanása. Mi több, az új nóva (Kepleré óta az első) nem volt valami látványos: legnagyobb fényessége sem érte el a 4-es magnitúdót.

A századfordulóig még három vagy négy, kevésbé nevezetes nóvát figyeltek meg. Az egyiket (neve Nova Aurigae) egy skót pap, *T. D.*

Anderson fedezte föl 1891-ben a Szekeres (latin nevén: Auriga) csillagképben.

Műkedvelő csillagász volt, aki az amatőrök nevéhez fűződő, számtalan jelentős csillagászati fölfedezés egyikét mondhatta magáénak. A Nova Aurigae-ra annak ellenére figyelt föl, hogy az csak egy gyöngé, 5-ös magnitúdójú csillag volt. Ahhoz, hogy egy ilyen csekély sugárzású új csillagot észrevegyen, szinte minden látható csillag égi elhelyezkedésére emlékeznie kellett.

Mire a huszadik század beköszöntött, már csaknem három évszázada nem láttak (ha az Éta Carinae kétséges esetétől eltekintünk) 1-es magnitúdójú nóvát.

1901. február 21-e éjszakáján aztán, miközben épp hazafelé sétált, *Anderson* fölfedezte a második nóváját! Ez a Perzeusz csillagképben fénylett föl, ezért a Nova Persei nevet kapta. *Anderson* azonnal értesítette a Greenwichi Obszervatóriumot, és a hivatásos megfigyelők rögtön a csillagra irányították távcsöveiket. Csodálatosképpen *Anderson* idejekorán csípte el, amikor fényereje még egyre fokozódott. Két nappal később a Noya Persei 0,2 magnitúdójú csúcsértéket ért el, és olyan fényes lett, mint a Véga.

Ekkorra már a csillagászok számára is kezdetét vette a fényképezés korszaka, így sokkal kedvezőbb helyzetben voltak, mint elődeik. Vajon készült-e fénykép a Nova Persei megjelenése előtt az égboltnak arról a részéről, amelyben az fölfénylett?

Szerencsére igen. A Harvard Obszervatóriumban mindössze két nappal *Anderson* fölfedezése előtt fölvételt készítettek az ég ugyanezen tartományáról. Ott, ahol most a Nova Persei ragyogott, a haryardi fényképek egy nagyon halvány, 13-as magnitúdójú csillagot mutattak, körülbelül 6,-,-ad akkora fényességgel, mint amekkora az éles szem számára szükséges ahhoz, hogy távcső nélkül meglássa.

Négy nap alatt a Noya Persei tizenhárom magnitúdóval lett fényesebb, vagyis fényereje mintegy 160 000-szeresére nőtt. Szinte azonnal szabálytalan módon halványulni kezdett, és néhány hónap múltán szabad szemmel ismét láthatatlanná vált. Végül újra 13-as magnitúdójú lett.

Mintegy hét hónappal a Noya Persei fölviillanása után a fényképezés újabb bizonyosságát adta használhatóságának. A szem számára, még távcsövön keresztül is, a csillag csak csillagnak látszott. Ha viszont szem helyett egy fényképezési filmet helyeztek a távcső fókuszába és hosszú expozíciós időket alkalmaztak, akkor elegendő fény gyűlt össze, hogy egy halvány fényfátyol váljék láthatóvá a Nova Persei körül, amelynek mérete heteken-hónapokon át fokozatosan növekedett. Ezt a tágulást a csillag fölfénylő fázisában kibocsátott fény okozta, amely fénysebességgel terjedt kifelé minden irányban, és megvilágította a csillag körüli ritka por- és gázfelhőt. 1916-ban, tizenöt évvel később, már egy halvány, ritka gázgyűrűt lehetett megfigyelni a csillag körül; magát a gázt a csillag dobta ki

fölvillanásakor, és az most minden irányban tágul, bár a fényénél lényegesen kisebb sebességgel.

Egyértelművé vált, hogy a csillag egy titáni robbanáson ment át, amely gázokat dobott ki és fényfölvillanást is okozott. Ez kétségbevonhatatlan volt, még ha a csillagászok nem is tudtak semmit a csillag belsejében végbement eseményekről, vagy arról a mechanizmusról, amely egy csillag fölrobbanását képes előidézni. Nevét viszont tudtak adni a jelenségnek: a Nova Persei a *kitörési változók* vagy *robbanó változók* egy példája volt. Lehet, hogy minden nóva egy-egy kitörési változó, s ezzel a kifejező és pontos névvel kellene helyettesíteni a „nóva” megjelölést. Mindegy: a „nóva” elnevezés attól a naptól kezdve él, hogy Tycho először használta, és minden jel szerint életben is marad.

Számos megfigyelő észlelt egymástól függetlenül egy még fényesebb nóvát 1918. június 8-án a Sas (latinul: Aquila) csillagképben. Ekkor 1-es magnitúdója volt, és két nappal később érte el a csúcspontot, amikor – 1,1 magnitúdóval ragyogott, majdnem olyan fényesen tehát, mint a Szíriusz.

A Nova Aquilae az első világháború idején jelent meg. A korábbi évszázadokban ezt sokan rossz előjelnek tekintették volna. Valójában még a huszadik században is akadtak, akik annak tartották. A háború befejezéséhez közeledett, és 1918 tavaszán a németek nagy offenzívát indítottak Franciaországban, egy végső erőfeszítést a győzelemért. Utolsó tartalékaikat is bevetették, és sikerült is fenyegetően előrenyomulniuk, ám ez sem bizonyult elegendőnek. Június elejére a német támadás kifulladás, a franciák és az angolok pedig a növekvő létszámú amerikai csapatok segítségével folytán hirtelen új erőre kaptak. Világossá vált, hogy Németországnak vége, és valóban, öt hónapon belül megadta magát. A Nova Aquilae-t a fronton a szövetségesek katonái „a győzelem csillagának” nevezték.

A Harvard Obszervatóriumnak a kitörés előtt készült fényképei ezúttal is igen halvány égitestnek mutatták a csillagot, amely valahol 10-11 magnitúdó között változott. A fényerő öt nap alatt 50 000-szeresére nőtt, de amint várható volt, gyorsan el is halványodott. Szeptemberre már alig volt látható szabad szemmel, nyolc hónap elteltével pedig már csak távcsővel lehetett észrevenni.

A Nova Aquilae volt a legfényesebb nóva az égbolton 1604 óta, és az azóta eltelt időben sem követte egyetlen hasonló sem. Mindazonáltal a fényesség nem az egyetlen módja annak, ahogy egy nóva hirt adhat magáról.

Egyre terjedt az a meggyőződés, hogy a nóvák gyöngé, észre sem vehető csillagokból keletkeznek. Ha valaki egyszerűen ránéz egy csillagra, amely később nóvává válik, ezen a *pre-nóván* semmi figyelemre méltót sem talál. Csakhogy annál többet is tehetünk, mint hogy ránézünk egy csillagra.

A csillagászok az 1800-as évek vége óta rendelkeznek színképelemző készülékkel, úgynevezett *spektroszkóppal*, amely a fényhullámokat hullámhosszuk szerinti rendben képes fölbontani. Ez a szivárvány színeit eredményezi: vöröset, narancsot, sárgát, zöldet, kéket és ibolyát (csökkenő hullámhossz szerint). A fényintenzitás eloszlásából és a hiányzó hullámhosszokból (amelyek fekete sávokként jelentkeznek a spektrumban) a csillagászok immár meg tudják mondani, hogy egy csillag közeledik felénk

vagy távolodik tőlünk; hogy forró vagy hideg; hogy milyen a kémiai összetétele, és így tovább.

Mit mondhatunk most már a pre-nóvák spektrumáról?

Sajnos, egy halvány csillag spektrumát rendkívül nehezen lehet megkapni, ráadásul halvány csillagból nagyon sok van. Még számítógépekkel is borzasztó feladat lenne fölvenni az égbolt összes csillagának spektrumát, ténylegesen pedig csak igen csekély hányaduké áll rendelkezésünkre. Amikor a csillagászok érdeklődni kezdtek a Nova Aquilae iránt, megtalálták annak az eredeti csillagnak a spektrumát, amelyből az föllángolt. Mára is a Nova Aquilae az egyetlen olyan nóva, amelynek fölvtették a spektrumát, mielőtt fényesedni kezdett.

A spektrum azonban semmi szokatlant sem mutatott a Nova Aquilae pre-nóva állapotában, kivéve hogy a csillag forró volt, 12 000 °C körüli felszíni hőmérséklettel (a mi Napunké 6000°). Ezért aztán (anélkül, hogy részletesen ismernék a csillag belsejében végbemenő folyamatokat, és azt, hogy miként vezetnek ezek robbanáshoz a nóvává váláskor) a csillagászok azt várják, hogy a forró csillagok fölrobbanásának nagyobb lesz a valószínűsége, mint a hidegek esetében.

1934 decemberében a Herkules csillagképben jelent meg egy nóva, amelyet Nova Herculis-ként emlegetnek. Korábban a Nova Herculis gyöngén változó csillag volt, 12-14 magnitúdó között ingadozva. A később kielemezett fényképek tanúsága szerint december 12-én, amikor fölfénylett, még mindig túl halvány volt ahhoz, hogy szabad szemmel észrevehető legyen. December 13-án azonban már 3-as magnitúdójú volt, és egy angol amatőr csillagász észlelte.

Nóvához képest elég lassan növekedett a fényessége, de december 22-re 1,4 magnitúdójú csúcserőre ért el. Utána szabálytalanul visszaesett, kissé gyengülve, majd valamelyest újra erőre kapva, és április 1-jén már épp csak észrevehető volt szabad szemmel. Azután gyorsan gyengült, május 1-jére 13 magnitúdó körül járt, körülbelül ott, ahol induláskor lehetett.

A csillagászok már (teljes joggal) más csillagok tanulmányozására tértek át, csakhogy a Nova Herculis szinte rögtön újra fényesedni kezdett. Június 2-re 9-es magnitúdóval világított. Fényessége elég lassan nőtt szeptemberig, amikor is 6,7-nél tartott, közel járva ahhoz, hogy szabad szemmel is észre lehessen venni. Ekkor nagyon lassan megint halványulni kezdett, és csak 1949-ben, tizenöt évvel első jelentkezése után érte el ismét a 13-as magnitúdót.

Egyre nyilvánvalóbb, hogy a nóvákat nem úgy kell elképzelnünk, mint amiknek csak egyszer növekedhet meg a fényereje. Valóban

ismeretesek ilyen *visszatérő nóvák*. Az Északi Korona (latin nevéen: Corona Borealis) csillagképben egy nóva 2-es magnitúdójú csúcsértéket ért el 1866-ban, majd ugyanez pontosan megismétlődött 1946-ban. Akadnak olyan nóvák, amelyek három, sőt négy csúcsot is mutattak. Lehet, hogy az Éta Carinae is visszatérő nóva, bár, mint látni fogjuk, még ennél érdekesebb lehetőségek is vannak.

A legutóbbi fényes nóva 1975. augusztus 29-én jelent meg a Hatytyú csillagképben.* A Nova Cygni szokatlan hirtelenséggel villant föl, mintegy tizenkilenc magnitúdóértéknyi növekedéssel egészen 2-es magnitúdóig. Fénye egyetlen nap alatt harmincmilliószorosára nőtt, aztán viszont gyorsan kialudt, és három héten belül eltűnt a szemünk elől. Úgy látszik, minél gyorsabb és erősebb a fényességnövekedés, annál gyorsabb és erősebb az elhalványulás is, bár az utóbbi mindig lassúbb, mint az előbbi volt.

MILYEN FÉNYES? MENNYIRE GYAKORI?

Mekkora fényt bocsátanak ki valójában a nóvák? Mindeddig úgy beszéltünk róluk, mint amelyek fényessége ennyi vagy annyi magnitúdójú, mint amelyek egyenlő fényesek a Szíriusszal vagy fényesebbek a Vénusznál — csakhogy ez nem árul el mindent róluk. Egy nóva vagy azért látszik ragyogóbbnak egy másiknál, mert valóban fényesebb (latinosan szólva: luminózusabb), vagy azért, mert közelebb van hozzánk, és így a valóságosnál fényesebbnek tűnik.

Manapság már vannak módszereink a csillagok távolságának megbecslésére. Ismerve egy csillag fényességét és tényleges távolságát, nem nehéz kiszámítani, hogy milyen fényes lenne valamilyen más távolságban. Egy egyszerű szabály adja meg, milyen mértékben lenne halványabb, ahogy a távolsága nő, illetve fényesebb, ahogy a távolsága csökken: a fényesség a távolság négyzetével fordított arányban változik.

A mi Napunk kiugróan a legragyogóbb csillag az égen. Fényessége — 26,91 magnitúdójú, míg a koyetkező legfényesebb csillagé, a Szíriuszé — 1,42. A Nap 25,49 magnitúdóértékkel fényesebb a Szíriusznál, márpedig minden egyes magnitúdó a fényesség 2,512-szeres növekedését jelenti. Így égboltunkon a Nap tizenötmilliárdszor fényesebben süt a Szíriusznál.

A Nap ugyanakkor kiemelkedően a legközelebbi csillag is az égen. Mindössze 150 millió kilométernyire van tőlünk, ami 0,000 005 parszek távolságnak felel meg. A Szíriusz viszont 2,65 parszeknyire, vagyis 530 000-szer messzebb van, mint a Nap.

Tegyük föl most, hogy a Napot és a Szíriuszt ugyanabból a távolságból nézzük! (A csillagászok e célra általában a tíz parszeknyi távolságot szokták választani.)

messzebb, mint most. Fényessége a reciprok négyzetes törvény szerint $2\,000\,000 \cdot 2\,000\,000$, vagyis 4 000 000 000 000-od részére csökkenne. Mivel minden magnitúdó 2,512-szeres fényességcsökkenést jelent, így a Nap fényrendje, a négybilliószoros csökkenésnek megfelelően 4,69 magnitúdó lenne. Tíz parszek távolságból tehát a Nap 4,69-os magnitúdójú volna: ennyi az *abszolút fényessége*. Egy ötödik fényrendű csillag lenne tehát, az égi közösség meglehetősen szerény tagja.

A Szíriusznál, amely 2,65 parszek távolságra van, csak 34-szeresére kell növelni a távolságot, hogy az tíz parszek legyen. Fényessége ezáltal csökkenni fog, de nem sokkal: tíz parszek távolságban a Szíriusz abszolút fényessége 1,3 magnitúdó lenne. Még ekkora távolságból is első fényrendű csillag volna, bár nem tartozna a legfényesebbek közé.

Amikor *fényességről* beszélünk, akkor arra a magnitúdó-értékre gondolunk, amivel a csillag jelenleg rendelkezik az égbolton. Ha két csillag látványát úgy akarjuk összehasonlítani, mintha egyforma távolságból látnánk őket (más szóval, ha abszolút fényességüket hasonlítjuk össze), akkor *luminozitásról* fogunk beszélni.

Két tárgy viszonylagos fényessége többek között a távolságnak is függvénye; ezért aztán, ha a kezünkben tartjuk, még egy égő gyufaszál is fényesebb lesz a Szíriusznál. A valós helyzetet két tárgy luminozitásának összehasonlítása tükrözi: ez mondja meg, hogy melyik tárgy bocsát ki igazából több fényt és mennyivel.

Azonos távolság esetén a Szíriusz 3,4 magnitúdó-értékkel fényesebb Napunknál. Ez azt jelenti, hogy luminozitása 23-szor nagyobb, mint a Napé.

Hol helyezkednek el ezen a skálán a nóvák? Egy-egy nóva távolságát gyakran nem könnyű megítélni, mivel többnyire eléggé messze vannak. Sok nóva megfigyelésével nyert információinkból azonban megállapítható, hogy abszolút fényességük a nóva-föllobbanás előtt átlagban 3 magnitúdó körül volt, kezdetben tehát mintegy ötször akkora luminozitással rendelkeztek, mint a mi Napunk. A csúcsponton abszolút fényességük átlagosan — 8 magnitúdó, vagyis legfényesebb állapotában egy nóva luminozitása körülbelül 150 000-szerese lehet a Napénak. Ez természetesen csak egy átlagérték.

Egyes csillagászok kétfajta nóvát: gyorsat és lassút különböztetnek meg.

A gyors nóvák luminozitása 100 000-szeresre vagy még nagyobb arányban növekszik meg, s ez mindössze néhány nap alatt megy végbe. A luminozitás egy hétnél rövidebb ideig marad a csúcson, és utána fokozatos, mérsékelt gyors visszaesés következik.

A lassú nóvák luminozitása lassabban és szabálytalanabban fokozódik, és kisebb mértékben is nő meg. Ezt követően pedig még lassabban és szabálytalanabban csökken, mint a gyors nóvák esetében.

* A könyv megírása utáni fejleményekről lásd a *Függelék*et (A szerk.)!

Ha a Napot tíz parszek távolságba képzeljük, akkor kétmilliószor lesz

A Nova Persei és a Nova Cygni a gyors nóvák közé tartozott, a Nova Aurigae és a Nova Herculis viszont a lassúakra példák. A visszatérő nóvák luminozitása, legalábbis azoké, amelyek néhány évtizedenként térnek vissza, kisebb arányban növekszik, mint a közönséges nóváké (beleértve a lassú nóvákat is).

Mennyire gyakoriak a nóvák?

1900 előtt alig láttak ilyeneket, manapság viszont gyakrabban észlelik őket. Ez nem azért van, mintha a nóvák száma nőtt volna – egyszerűen többen figyelik őket, és jobb észlelési technika áll a csillagászok rendelkezésére. De még így is tévednénk, ha azt hinnénk, hogy valamennyiüket látjuk.

Hogy ennek az okát megérthessük, először azt a kérdést kell föltennünk: hány csillag létezik egyáltalán? Szabad szemmel körülbelül 6000-et látunk, távcsővel viszont több milliót.

Végtelen nagy lenne a számuk, ahogy Cusanus gondolta?

A végtelen nagy szám ellen szól a Tejút, a mi Galaktikánk, az a csillagfényből álló hatalmas szalag, amely egünket körülöleli, és amely távcsövön át nézve nagyon halvány csillagok óriási csoportjának mutatkozik.

A Galaktika össztömege a Napénak mintegy százmilliárdszorosa. Azonban a legtöbb csillag mérete és tömege jelentősen kisebb, mint a Napé. Ezért aztán lehet, hogy a Galaktikában a csillagok száma 250 milliárd körül jár.

A csillagászok úgy becsülik, hogy az egész Galaktikában átlagosan körülbelül huszonöt nóva van évente. Ha ezt összevetjük a Galaktika összes csillagának számával, azt kapjuk, hogy mindezen csillagok közül egy év alatt tízmilliárdból egy válik nóvává.

Az, hogy évente huszonöt nóva lehet a Galaktikában, nem jelenti azt, hogy ennyit látni is fogunk, akármilyen árgus szemekkel figyeljük is. A porködök miatt, amelyek a Galaktika központját rejtik előlünk, biztosan nem látunk nóvákat föllángolni a központ közelében (ahol pedig a csillagok többsége található), sem pedig a Galaktika távolabb eső felében.

Így aztán valószínű, hogy évente a legjobb esetben is mindössze két vagy három nóva fényre ér el hozzánk.

Kis és nagy csillagok

A NAPENERGIA

Ha belegondolunk, hogy egy nóva néhány napra százezerszeresére növeli a luminozitását, azt is érzékelnünk kell, milyen hatalmas mennyiségű energiát bocsát ki az űrbe. Egy átlagos nóva a csúcspontján egy nap alatt sugároz ki annyi energiát, amennyit a Nap fél év alatt. Honnan származik ez az energia?

Mielőtt erre válaszolnánk, azt kell megkérdeznünk, honnan nyeri energiáját maga a Nap. A Nap 4,6 milliárd éve ragyog többé-kevésbé úgy, mint ma. Ennyi idő alatt hihetetlen mennyiségű energiát használt el, és még most is süt, sőt

ezt további öt-hatmilliárd évig ugyanígy fogja folytatni. Miből ered mindez az energia?

Az 1800-as évek közepéig senkit sem izgatott különösebben ez a kérdés. Az ókoriak és a középkoriak úgy gondolták, a Nap valamilyen különleges égi anyagból van, amely egyszerűen rendelkezik azzal a képességgel, hogy világítani bír. A földi dolgok idővel mind tönkremennek, ő viszont sohasem szűnik meg fényleni. S azt sem tudták, hogy a Nap ennyire öreg. Úgy hitték, mindössze néhány ezer éve világít.

Ahogy teltek az 1800-as évek, a tudósokat egyre inkább nyugtalanítani kezdte a dolog. Már nem hittek abban, hogy az égitestek kémiai összetétele alapvetően különböznék a Földétől. Kezdték belátni, hogy a Nap életkora nem évezredekre, hanem évmilliókra rúg; másfelől kezdték mind alaposabban és alaposabban tanulmányozni az energia tulajdonságait.

1847-ben *Hermann L. F. von Helmholtz* (1821-1894) német fizikus az energiaváltozással járó folyamatok gondos tanulmányozása révén kidolgozta az energiamegmaradás törvényét. A törvény azt állítja, hogy a folyamatokban energia sem nem teremthető, sem meg nem semmisülhet, csupán a formája változhat meg. Ugyanerre a gondolatra jutottak más tudósok is az 1840-es években, mégis Helmholtz szolgáltatotta a legmeggyőzőbb bizonyítékokat, így általában az ő érdeméért szokás elkönyvelni ezt a törvényt.

Mi több, Helmholtz volt az első, aki teljes figyelmét a napenergia problémájára összpontosította. A Nap sehonnan sem kaphatja az

energiáját; a Nap nem teremtheti a semmiből az energiáját – akkor viszont honnan származik ez az energia?

Helmholtz különböző, jól ismert energiaforrások révén kísérlete megmagyarázni a dolgot. Nyerheti-e a Nap az energiát közönséges kémiai égésből? Kaphatja-e a folytonosan lehulló meteoranyagból? Első próbálkozásai vagy nem szolgáltatott elegendő mennyiségű energiát, vagy a Nap tömegének olyan megváltozásával kellett volna járniuk, amelyet könnyen lehetett volna mérni – viszont semmi ilyesmi sem volt tapasztalható.

1854-ben Helmholtz végül is úgy döntött, hogy az egyedüli ismert forrás, amely a Napot éltetheti, ugyanakkor nem jár végzetes bonyodalmakkal, nem más, mint az az energia, amelyik önnön összehúzódásából ered. Anyaga lassan befelé omlik, ez az esési energia sugárzássá alakul, és évmilliókra ellátja a Napot energiával.

Ez a magyarázat, mindent egybevéve, mégsem volt kielégítő. Hiszen ha a Nap néhány tízmillió éve összehúzódóban van, akkor kiinduló méretének olyan nagynak kellett lennie, hogy egészen a Föld pályájáig kellett volna terjednie. A Föld csak akkor jöhetett volna létre, amikor a Nap már lényegesen kisebb lett, így bolygónk mindössze néhány száz tízmillió éves lenne.

Az 1800-as évek vége felé a geológusok is, a biológusok is erősen gyanították, hogy a Föld (és így a Nap is) jóval idősebb, mint néhány száz tízmillió év. A Földnek legalább több százmillió évesnek, sőt talán egymilliárd évesnél is öregebbnek kell lennie. A Nap szintén legalább ilyen idős kell hogy legyen, az összehúzódás tehát közel sem lehet az, ami az ehhez elegendő energiát szolgáltatja. Akkor viszont mi?

Ahogy a századvég eljött, egy új energiaforrás vált, meglehetősen váratlanul, ismertté az emberiség számára. 1896-ban *Antoine-Henri Becquerel* (1852-1908) francia fizikus fölfedezte a *radioaktivitást*. Azt találta, hogy a fémuránium atomjai bár nagyon lassan, de folyamatosan más, kisebb atomokká bomlanak el.

1901-ben egy másik francia fizikus, *Pierre Curie* (1859-1906) rájött, hogy a radioaktivitás kis mennyiségű hőtermeléssel jár. Ez nagyon kicsiny mennyiség. Mégis, mivel a radioaktív átalakulások évmilliárdokon át folyhatnak, a Földnek mint egésznek a radioaktívanyag-tartalmát tekintve a termelt összes hőmennyiség iszonyú nagy lehet. Kiderült, hogy egy új, nagyon intenzív energiaforrást fedeztek föl.

1906-ban *Ernst Rutherford* (1871-1937) új-zélandi születésű fizikus kimutatta, hogy az atom nem egyetlen apró gömb, mint korábban gondolták, hanem még kisebb „szubatomi részecskékből”, javarészt (ahogy ma tudjuk) protonokból, *neutronokból* és *elektronokból* áll. A protonok és a neutronok, ezeknek a piciny részecskéknél viszonylag a nehezebbjei, az atom kellős közepén lévő, hasonlóan apró magban foglalnak helyet. Ekörül keringenek a könnyű elektro-

nok. A mag az, ami a radioaktivitás során változást szenved és energiát termel, így végül is „magenergiáról” kezdtek beszélni. Lehetséges tehát, hogy a napsütés a magenergia következménye? A XX. század első évtizedeiben a magenergia egyedül ismert forrása bizonyos elemek, így az urán és a tórium atomjainak radioaktív bomlása volt. Lehet, hogy a Nap egy hatalmas urán- és tórium-golyó?

Nem, nem lehet. Az 1900-as évek elejére a színekélelemzés révén – amiről könyvünk egy korábbi helyén volt szó – már ismerték a Nap kémiai összetételét. Nézzük tehát ismét ezt a bizonyos spektroszkópot!

A Nap fénye, amikor egy üvegprizmán halad keresztül, szivárványszerű színeképpé (latin szóval: *spektrum*má) bomlik szét, amint arra először *Isaac Newton* (1642-1727) angol tudós mutatott rá 1666-ban. Ez azért következik be, mert a fény különböző hosszúságú piciny hullámokból áll, és az üvegprizmán keresztülhaladva minden egyes fénysugár a hullámhosszától függő mértékben törik meg. Minél rövidebb a hullám, annál jobban megtörik. Ezért a színeképek sorban az összes szórt hullámot tartalmazni fogja, az egyik végén a leghosszabbakat, a másikon a legrövidebbeket.

1814-ben *Joseph Fraunhofer* (1787-1826) német optikus fölfedezte, hogy a napszíneképekben számos sötét vonal található. Ezek (ma már tudjuk) azért jelennek meg, mert a Nap légköre a rajta áthaladó fényből bizonyos hullámhosszúkat elnyel. A Földre érő napfényből ezek a hullámhosszok hiányoznak, s a hézagok fekete vonalakként mutatkoznak meg a színeképekben.

Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) német fizikus 1859-ben kimutatta, hogy a különböző fajtájú atomok csak rájuk jellemző, meghatározott hullámhosszakon nyelik el (vagy bocsátják ki, ha forróak) a fényt. Ha megvizsgáljuk az elnyelt, illetve kibocsátott hullámhosszakot, azonosítani tudjuk, hogy a fényt milyen atom nyelte el, illetve bocsátotta ki.

1861-ben *Anders Jonas Ångström* (1814-1874) svéd fizikus a napszíneképek bizonyos vonalait a hidrogénnel, a létező legegyszerűbb atommal azonosította. Először történt meg, hogy valamely égitest anyagának legalább egy részét egyértelműen azonosították – méghozzá egy olyan anyagnak, amely a Földön is létezik. Ennyit Arisztotelész elképzeléséről, amely szerint az égitesteket a maguk nemében egyedülálló elemek alkotják...

Ettől kezdve a napszíneképet mind részletesebb és részletesebb vizsgálatoknak vetették alá, és egyéb atomfajtákat is fölfedeztek a Napban – csupa olyat, amelyek mind léteznek a Földön is. A különböző atomok előfordulásának aránya is meghatározhatóvá vált. Így aztán teljes bizonyossággal állíthatjuk, hogy a Nap nem egy urán- és tóriumgolyó. Ezek az elemek csak nyomokban vannak benne jelen, és csak olyan energiamennyiség termelésére képesek, amely

teljességgel elhanyagolható a Nap állandó sugárzásának mennyisége mellett.

Azt jelentené ez, hogy a Nap energiája nem származhat a magenergiából?

Korántsem. 1915-ben egy amerikai kémikus, *William Draper Harkins* (1873-1951) olyan elméleti megfontolásokkal állt elő, amelyek azt föltételezték, hogy a közönséges radioaktivitáson kívül számos más magátrendeződés is járhat energiafelszabadulással. Közelebbről kimutatta, hogy az egyik, szokatlanul nagy mennyiségű energiát létrehozó magátalakulás az, amikor négy hidrogénmag egyetlen héliummaggá egyesül. Föltételezte, hogy ez a – mai nevén – *hidrogénfúzió* szolgáltatja a Nap energiáját.

Problémát csak az okozott, hogy a Földön a radioaktivitás spontán módon megy végbe, és nyilván ugyanilyen spontán módon menne végbe a Napban is; az uránhasadás ily módon kézenfekvő energiaforrás volna, ha a Napban elegendő urán lenne. A hidrogénfúzió viszont nem megy végbe közönséges körülmények között, hanem rendkívül magas hőmérsékletet igényel: akkora hőmérsékletet, amelyet még a Nap izzó felszíne sem biztosíthat.

Az 1920-as években Eddington azt a kérdést tette föl: vajon miért nem roskad össze és zsugorodik apróvá a Nap saját óriási gravitációs vonzásának hatása alatt? Az egyetlen erő, amely kiterjedését képes a gravitáció ellenében fenntartani, a hő; és Eddington kiszámította, milyen forrónak kell lennie a Nap belsejének ahhoz, hogy tényleges méretét megőrizhesse. Kiderült, hogy ehhez több millió fokos hőmérséklet szükséges; a Nap középpontjának jelenleg elfogadott hőmérsékletértéke 15 000 000 °C.

Továbbmenve: 1929-ben *Henry Norris Russell* (1877-1957) amerikai csillagász minden addiginál nagyobb részletességgel megállapította a Nap összetételét. Színképelemzés révén arra a következtetésre jutott, hogy a Nap tömegének körülbelül 75 százaléka hidrogén, a fennmaradó 25 százalék pedig hélium. Ez a két legegyszerűbb atom. Az összes bonyolultabb atom együttvéve legföljebb a Nap 1 százalékát teszi ki.

Ha a Nap lényegében egy hidrogén- és héliumgolyó, akkor a hidrogénfúzió az egyetlen lehetséges magreakció, amely a sugárzásához szükséges energiát biztosíthatja. Továbbá, ha a felszíne nem is, de a belseje kellően magas hőmérsékletű ehhez.

1938-ban *Hans Albrecht Bethe* (1906–) német-amerikai fizikus, számításba véve a Nap összetételét és középponti hőmérsékletét, kidolgozott egy ésszerű mechanizmust arra, hogy mi is történik a Nap közepében. Ezt azóta tovább finomították, de a lényeg röviden mégiscsak az, hogy a napenergiát négy hidrogénmagnak egyetlen héliummaggá való egyesüléséből eredeztetik, ahogy azt negyed századdal korábban Harkins javasolta.

Ami érvényes a Napra, az kétségtelenül érvényes a többi csillagrais, így a napenergia problémáját megoldva nagy valószínűséggel megoldottuk általában a csillagok energiájának problémáját.

A hidrogénfúzió folyamata egyensúlyi feltételek mellett megy végbe, és

állandó (vagy csak nagyon lassan változó) energiakibocsátást eredményez, a különböző tömegű csillagoknál különböző hosszú ideig.

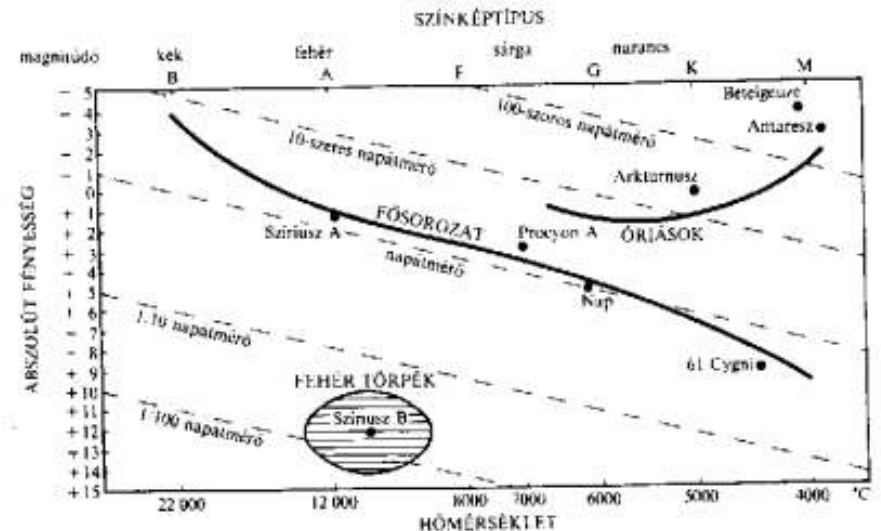
Minél nagyobb egy csillag tömege, annál több hidrogént tartalmaz, de annál több hő is szükséges ahhoz, hogy önmaga nagyobb gravitációs vonzásával szemben megtartsa a méretét. Ahogy a tömeg nő, „a kereslet meghaladja a kínálatot”. Ezzel azt akarjuk mondani, hogy egy nagy csillag nagy üzemanyagkészlete gyorsabban használódik el, mint egy kis csillag kis üzemanyagkészlete. Minél nagyobb tömegű egy csillag, annál rövidebb ideig működhet hidrogénfúziós berendezésként.

A nagyobb tömegű csillagok olyan gyorsan használják el üzemanyagukat, hogy mindössze néhány millió évig maradhatnak meg normál csillagoknak. A jóval kisebb csillagok viszont olyan ügyesen gazdálkodnak kisebb hidrogénkészletükkel, hogy akár 200 milliárd évig is megélhetnek belőle.

A Nap, amely e tekintetben közepes csillag, akkora hidrogénkészlettel rendelkezik, hogy tíz-tizenkét milliárd évig maradhat fenn. Most 4,6 milliárd éves, így még normál csillagként várható életének delelőjét sem érte el.

Az életciklusuk ezen stádiumában levő csillagokat „fősorozatbelieknek” szokták nevezni. A Nap egy fősorozatbeli csillag, csakúgy, mint az égen látható csillagok közel 85 százaléka.*

* Az úgynevezett Hertzsprung–Russell-diagramról van szó, amely a megfigyelt csillagok abszolút fényességét mutatja a színük (színképtípusuk) függvényében. Ezen a fiatal, hidrogénfúziót folytató csillagok a „főágon” (vagy „fősorozatban”) helyezkednek el – hogy pontosan hol és mennyi ideig, az tömegüktől függ. A hidrogénüzem-anyag kimerülésével a csillag gyors ütemben átcsúszik az „óriáságra”, ahol a hélium és a nehéz magok fúziója tartja fenn. Ezen energiaforrásokat elhasználva a csillag összeroppan, és – mint erről a könyvben még bőven esik szó – a „fehér törpék” tartományába kerül (*A ford.*):



FEHÉR TÖRPÉK

Nem minden csillag tartozik azonban a fősorozatba. Ennek fölfedezése kezdetben semmiféle kapcsolatban sem látszott állni tárgyunkkal, végül mégis ez vezetett el a nóvák természetének magyarázatához. Lássuk hát, hogyan is történt!

A csillagokat mindig egyedi objektumoknak tekintették. Helyenként persze néhány csillag mintha csoportot alkotna, de az emberek vagy a fák is lehetnek szoros közelségben, mégis független, egyedi objektumok maradnak.

Amint a távcsövet föltalálták, látható lett, hogy a csillagok itt-ott szorosabban csoportosulnak, mint ahogy addig képzeltük. Egy-egy csillagpáros tagjai tényleg annyira közel vannak egymáshoz, hogy szabad szemmel egyetlen csillagnak látszanak. Korábban említettem, hogy például a 61 Cygni is és az Alfa Centauri is olyan „csillag”, amelyik valójában nagyon szorosan összekapcsolódó csillagpárnak bizonyult.

Amikor világos lett, hogy a csillagok az űr hatalmas térségeiben szóródnak szét, azzal lehetett érvelni, hogy két szorosan egymás melletti csillagból az egyik biztosan közelebb van hozzánk, a másik pedig sokkal, de sokkal távolabb. A két csillag tehát egyáltalán nincs egymás mellett, csak úgy látszanak, mivel nagyjából ugyanabba az irányba esnek.

Ha a csillagok véletlenszerűen oszlanak el az űrben, akkor van valamelyes esély arra, hogy egyesek többé-kevésbé közvetlenül mások mögött helyezkedjenek el, s így egymás mellett lássuk őket. *John Michell* (1724-1793) angol geológus azonban 1767-ben bebizonyította, hogy az egymás közvetlen közelében lévő csillagok száma jóval nagyobb, mint ahogy azt a véletlen eloszlás alapján várni lehetne. Ezért föltételezte, hogy bizonyos csillagok ténylegesen párokat alkotnak.

Goodricke 1782-ben, talán épp Michell érvelésétől bátorítva, azt állította, hogy az Algol igazából egy olyan csillagpár, amelynek tagjai egymás körül keringenek oly módon, hogy az egyik periodikusan elfödi a másikat – ez azonban csak egy logikus föltételezés volt, nem pedig tényleges megfigyelés.

William Herschel (1738-1822) (annak a *John Herschel*nek az apja, aki az Éta Carinae-t vizsgálta) az 1780-as években olyan csillagokat tanulmányozott, amelyek nagyon közel vannak egymáshoz. Azt remélte, hogy az egyik közelebb, a másik távolabb van a Földtől, és így a közelebbi parallaxisát meg lehet határozni a távolabbiéhoz viszonyítva, ebből pedig ki lehet számítani a közelebbi csillag távolságát.

A parallaxis meghatározása helyett azonban azt a fölfedezést tette, hogy sok esetben a két csillag nyilvánvalóan egymás közvetlen környezetében mozog. Közvetlenül meg tudta figyelni, hogy ezt teszik. Lehet, hogy a közönséges csillagpárok csak látszólag azok, de *Herschel kettőscsillagokat* látott, amelyek valóban közel voltak, olyannyira, hogy egymás gravitációs terében mozogtak. Mindkettőjük a közös tömegközéppont körül keringett.

Eleinte azt hitték, hogy a kettőscsillag ritka tünemény, de minél többen vizsgálták a csillagokat, annál több ilyen kettőst találtak. Ma úgy tudjuk,

hogy a létező csillagok 70 százaléka valamely kettős vagy még összetettebb rendszer tagja, s a mi Napunkhoz hasonló „szimpla” csillagok vannak kisebbségben.

Különösen egy bizonyos kettőscsillag fölfedezése eredményezett jelentős előrelépést.

Bessel (ő volt az, aki elsőként határozta meg egy csillag távolságát) a Szíriusz mozgását vizsgálta, hogy megmérje a távolságát. Észrevette, hogy a Szíriusz helyváltoztatása nem olyan jellegű, mint amit egy parallaxistól várnánk, hanem hullámvonal mentén halad egy bizonyos irányba. A hullámjelleg arra mutatott, hogy valamely közeli objektum gravitációs vonzása elliptikus pályára kényszeríti a Szíriuszt. Ez a pálya eredményezi, az egyenes vonalú mozgással kombinálódva, a hullámokat.

Ha egy olyan csillag, mint a Szíriusz, észrevehető hullámmozgásra kényszerül, az azt jelenti, hogy a másik objektumnak óriási a gravitációs vonzása. Ez a másik objektum csakis egy csillag lehet; ekkora hatást semmilyen kisebb test sem válthat ki. Bessel viszont semmi olyasmit nem látott a közelben, ami csillag lehetett volna, és 1844-ben arra a következtetésre jutott, hogy a Szíriusz egy „sötét kísérőjű” kettőscsillag. Kísérője, gondolta, olyan csillag, amely láthatatlan, mert már kiégett, és így egykori önmaga megfeketedett salakjaként halad az űrben.

1862-ben *Alvan Graham Clark* (1832-1897) amerikai távcsökészítő egy új távcsövet épített, és a Szíriuszra próbálta ki, hogy éles képet ad-e. Azt adott, csak hogy a Szíriusz közelében egy fényfoltot mutatott. Clark, azt gondolva, hogy a műszerével van baj, gondosan megvizsgálta a lencsét, de hibátlannak találta.

A fényfoltot vizsgálva Clark megállapította, hogy az éppen ott van, ahol Bessel „sötét kísérőjének” kellene lennie, ha tényleg az volna a felelős a Szíriusz hullámmozgásáért. A következtetés nyilvánvaló volt: ez az a kísérő.

A kísérő 8,4 magnitúdójú, tehát nem „sötét”, de csöppnyi módosítással nyugodtan hívhatjuk a Szíriusz „halvány kísérőjének”. Manapság a Szíriuszt magát Szíriusz A-nak, sötét vagy halvány kísérőjét pedig Szíriusz B-nek nevezik.

1893-ban *Wilhelm Wien* (1864-1928) német fizikus kimutatta, hogy egy csillag felületi hőmérsékletét meg lehet határozni színeképének finomszerkezetéből. 1915-ben egy amerikai csillagász, *Walter Sydney Adams* (1876-1956) tanulmányozni kezdte a Szíriusz B gyenge színeképét, és felületi hőmérsékletét meglepően magasnak találta. A Szíriusz B forróbb a mi Napunknál, bár nem annyira forró, mint a Szíriusz A.

Ha a Szíriusz B ilyen forró (márpedig a felülete 10 000 °C-os hőmérsékletű), akkor felszíne minden egyes darabkájának fényesebben, még hozzá sokkalta fényesebben kell izzania, mint a napfelület azonos nagyságú részének. Ebben az esetben viszont miért olyan halvány a Szíriusz B? Ez csak úgy lehetséges, ha a felülete rendkívül kicsi. A csillag ugyan fényesen izzik, de ez az izzó anyag tömeg kicsiny, így aztán az összfényesség is kicsiny lesz.

Ma úgy hisszük, hogy a Szíriusz B átmérője mindössze 11 100 kilométer. Valamivel kisebb tehát a Földnél, amelynek 12 756 kilométer az átmérője.

De csak hosszmereteit tekintve kicsi. Bessel anélkül is tudomást szerzett a jelenlétéről, hogy ténylegesen látta volna, mégpedig az óriási Szíriusz A-ra gyakorolt gravitációs hatása révén. Ez a gravitációs hatás nem lett kisebb attól, hogy a csillagászok egyszerűen fölfedezték, a Szíriusz B nem nagyobb egy kis bolygónál. Gravitációs vonzásából kiszámították, hogy tömege körülbelül a naptömeg 1,05-szorososa – s mindez a tömeg egy ilyen kicsiny, Földnél is kisebb méretbe van bezúfolva.

A Föld átlagos sűrűsége (ha az egész bolygót homogén tömegeloszlásúnak tekintjük) körülbelül 5500 kilogramm/köbméter. A Szíriusz B sűrűsége viszont 530 000-szer ekkora.

Így aztán a Szíriusz B átlagos sűrűsége úgy 3 milliárd kilogramm/köbméter körül van. Ha a Szíriusz B anyagából egy szokásos méretű pénzérmét készítenénk, az 1900 kilogrammot nyomna.

Viszont a Szíriusz B sűrűsége nem mindenütt egyforma. A felszín közelében a legkisebb, és amint befelé haladunk, egyre növekszik, s a magban válik a legnagyobbá. (Ez minden égitestre igaz, beleértve a Földet és a Napot is.) A Szíriusz B sűrűsége a középpontjában valószínűleg eléri a 33 milliárd kilogramm/köbmétert.

Amint rájöttek, hogy a Szíriusz B milyen kicsi, azonnal nyilvánvaló volt az is, hogy a sűrűsége sokkal nagyobb, mint akár a legnagyobb sűrűségű földi tárgyaké. Ez pár évvel azelőtt nevetségesnek tűnt volna, de Adamsnak a Szíriusz B hőmérsékletével kapcsolatos kulcsfontosságú fölfedezése idején már ismert volt, hogy az atom egy rendkívüli sűrűségű piciny magból és a körülötte levő, szinte tömeg nélküli elektronokból áll. Így aztán 1924-ben Eddington föltételezte, hogy az olyan objektumokban, mint a Szíriusz B, az atomok szétzúzódtak, a magok pedig sokkal közelebb kényszerültek egymáshoz, mint az ép atomokból álló anyagban.

Az ilyen összeroncsolt atomokat és egymáshoz préselt magokat tartalmazó anyagot *elfajultnak* nevezik. A Nap legbelsejében a hőmérséklet és a nyomás annyira nagy, hogy a közepe elfajult anyagból áll. Egy Szíriusz B-szerű csillag pedig szinte teljes egészében elfajult anyagból épül föl.

Valamely objektum felszínén a gravitáció nagysága az objektum tömegétől és felületének a középpontjától mért távolságától (vagyis a sugarától) függ. Például a Nap tömege a Földének 333 500-szoro-

42sa, sugara pedig 109,1-szerese a Föld sugarának, így a Nap felszíne a

középpontjától 109,1-szer messzebb van, mint a Föld esetében. A középponttól való nagyobb távolság gyengíti a gravitációs vonzást, ahogy azt a Nap felszínén is tapasztalhatnánk.

Ha a Nap felszíni gravitációját akarjuk kiszámítani, a tömegét el kell osztanunk sugarának a négyzetével. Tehát $\frac{333500 M_{\odot}}{109,1^2}$, ami körül-109,12 belül egyenlő 28-cal. Más szóval a Nap felszíni gravitációja mintegy huszonnyolcszorosa a földinek.

Ha viszont a Szíriusz B-t vesszük, nem feledkezhetünk meg arról, hogy bár tömege 1,05-ször nagyobb, a sugara viszont sokkal kisebb, mint a Napé. A Szíriusz B felszínének távolsága a középpontjától csak 0,008-ed része a Nap ugarának. A Szíriusz B felszíni gravitációja ezért $1,05 \cdot 28$ -szoros, tehát 470 000-szerese a Földének. 00082

Mivel a Szíriusz B hőmérsékletét illetően fehéren izzó, ugyanakkor ennyire kicsi, a *fehér törpék* közé soroljuk. És mivel a sűrűsége ilyen nagy, a mérete pedig ilyen kicsi, az *összeroppant csillagok* sorába tartozik.

A Szíriusz B és a többi fehér törpe már nem fősorozatbeli csillag. A fősorozatbelieknél a legbelsejükben végbemenő fúziós reakciók termelik a csillag méretét fenntartó hőt. Ha egyszer ezek a fúziós reakciók leállnak, a csillag nem őrizheti meg kiterjedését: saját gravitációs terének erői fehér törpévé roppantják össze.

Galaktika csillagainak mintegy 15 százaléka fehér törpe. Eszerint talán úgy negyvenöt milliárd fehér törpe lehet a Galaktikában. Kis méretük miatt annyira halványak, hogy csak a viszonylag közeli láthatók közülük. Még a Szíriusz B is, amely a hozzánk legközelebb eső fehér törpe, távcső nélkül láthatatlan maradna, akkor is, ha nem lenne ott szomszédságában a vakítóan fényes Szíriusz A.

VÖRÖS ÓRIÁSOK

Ma úgy tűnik: a fehér törpék jelentik a kulcsot a nóvaképződés rejtélyéhez – csak hogy nem önmagukban. Egy másik, szintén nem fősorozatbeli csillagfajttával is foglalkoznunk kell.

Amikor *Ejnar Hertzsprung* (1873-1967) dán csillagász 1905-ben kitalálta a „fősorozatot”, észrevette, hogy kétféle vörös csillag létezik. Vannak közöttük nagyon halványak és vannak nagyon fényesek, közepes fényességű vörös csillag viszont nincs.

Egy vörös csillag azért vörös, mert a felülete hideg, vagy legalábbis a hőmérséklete nem haladja meg a vörösizzásét; a Nap-szerű csillagok viszont fehéren izzanak. A vörös csillagok felszíni hőmérséklete nem lehet több csekélyke 2000 °C-nál. Az ilyen csillagoktól azt várnánk, hogy felületegységenként viszonylag kevés fényt bocsátanak

ki, és ha csak akkorák vagy kisebbek lennének, mint a Nap, akkor halványnak kellene lenniük. A halvány vörös csillagok ennél fogva nem keltenek meglepetést. De mivel magyarázzuk a nagyon fényes vörös csillagokat?

Ahhoz, hogy egy hideg csillag nagyon fényes legyen, az szükséges, hogy a felületegységenkénti nem túl nagy fénykibocsátást nagyon nagy felülettel pótolja ki – sokkalta nagyobb, mint amekkora a mi Napunké. A fényes vörös csillagok átmérője talán százszorosa is kell hogy legyen a Napénak. Ezért az olyan csillagokat, mint a Betelgeuze vagy az Antaresz, *vörös óriásoknak* nevezik.

Amikor a fősorozatot kitalálták, nyilvánvaló volt, hogy a vörös óriások nem tartoznak bele. Ésszerűnek látszott az a föltételezés, hogy a vörös óriások születőfélben lévő csillagok, amelyek saját gravitációs terük hatására lassan sűrűsödnek, ilyenformán egyre kisebbek és forróbbak lesznek. Végül a vörös óriások normál méretűvé és hőmérsékletűvé sűrűsödnek össze, s ezzel belépnek a fősorozatba.

Ma már nem ez az elfogadott álláspont. A tudósok megvizsgálták egyes olyan csillaghalmazokat, amelyekben minden csillag föltehetően azonos életkorú, mivel az egész halmaz nagy valószínűséggel egyszerre jött létre. A csillagászok kiderítették, hogy a halmaz minden csillaga fejlődik, és minél nagyobb tömegű egy csillag, a fejlődése annál gyorsabb. Ezért aztán meghatározták a különböző csillagok tömegét, és máris rendelkezésükre állt egy sorozatra való „pillanatfelvétel” a fejlődés egyes állomásairól. A legnagyobb tömegű csillagoknak a vörös óriások bizonyultak, ami arra mutatott, hogy, bár valóban nem tartoznak a fősorozatba, mégsem a csillagfejlődés korai állapotát, hanem egy későbbi állomását képviselik.

Hogyan keletkezik a vörös óriás?

A ma elfogadott válasz valahogy így hangzik: lassan, évmilliók-évmilliárdok alatt a csillag magjában levő hidrogén elhasználdódik, a fúzióban keletkezett hélium pedig, lévén nagyobb sűrűségű a hidrogénnél, összegyűlik a csillag kellős közepében. A hidrogénfúzió a központi, egyre növekvő héliumgolyó peremén tovább folytatódik, de figyelmünket most már a héliumra kell összpontosítanunk.

Ahogy a középpontban a hélium a saját súlya alatt összetömörül, a héliumgolyó állandóan kisebb, forróbb és egyre nagyobb sűrűségű lesz. Végül elég magas hőmérséklet és nyomás alakul ki ahhoz, hogy beindulhasson a *héliumfúzió*. A héliummagok egymással egyesülve bonyolultabb szén-, nitrogén- és oxigénmagokat képeznek.

A folyamat hőt termel a csillag számára, azon fölül, amit a szokásos hidrogénfúzió szolgáltat a héliumból álló sűrű mag peremén. Ez a csillag külső rétegeinek túlfűtését és nagyfokú kitágulását eredményezi, sokkal nagyobb mértékben, mint egy tisztán hidrogénfúzióból élő normál csillag esetében. Úgy vehetjük, hogy a táguló csillag ezen a ponton hagyja el a fősorozatot.

Ahogy a külső rétegek tágulnak, lehűlnek a vörösizzás hőmérsékletére; a felületnövekedés viszont még nagyobb is, mint ami ennek az ellensúlyozásához szükséges. Ha ugyanis a csillag átmérője 100-szorosára

növekszik, akkora a felülete $100 \cdot 100 = 10\,000$ -szerese lesz; így a teljes kisugárzott hőmennyiség – a hidegebb felület ellenére – sokkal nagyobb, mint a normál csillagok legtöbbjénél.

A héliumfúzió jóval kevesebb energiát szolgáltat, mint a hidrogénfúzió, így a héliumkészletek lényegesen rövidebb idő alatt fogynak ki, mint a hidrogénkészletek. A héliumfúzió termékei tovább fuzionálhatnak, de a héliumfúzióból nyerhető összes energia még így sem több a hidrogénfúzióból nyerhető mennyiség egyhuszad részénél –márpedig a vörös óriás félelmetes gyorsasággal folytatja az energia-kibocsátást.

Ez azt jelenti, hogy a vörös óriás állapot nem állhat fenn valami hosszú ideig – mármint a csillag szempontjából. Emberi szempontból persze igen, mert egy-két millió évig azért fennmaradhat. Ezért látható viszonylag kevés vörös óriás. A Galaktika csillagainak csupán egy százaléka ilyen, vagyis mindössze kb. 2,5 milliárd van belőlük az egész Galaktikában. Ennek természetesen csak a Galaktika hozzánk közeli részébe eső töredékét láthatjuk, még akkor is, ha egyébként messzire ellátszanak, és nem esnek valamely porfelhő irányába. A csillagok többsége vagy nem érte még el, vagy már maga mögött hagyta a vörös óriás állapotot.

A vörös óriás közepében a magfúzió addig halad tovább, amíg csak a hőmérsékletnövekedés elegendő az újabb fúziókhoz. A legnagyobb tömegű csillagokban a hőmérséklet tényleg nagyon megemelkedhet, de a fúzió még így is csak a vas keletkezéséig folytatódhat. A vas-atommagok jelzik a halálos véget. Ezek aztán akár kisebb darabokra törnek szét (ez az ún. *maghasadás*), akár nagyobbakká egyesülnek, energia semmiképp sem termelődik. Sőt, mindkét esetben energiapótlásra van szükség. A vas-atommagokat úgy tekinthetjük, mint a csillag belsejében végbemenő fúziós reakciók végső „hamuját”.

Akár az következik be, hogy a vörös óriás magja elér egy maximális hőmérsékletet, amelyet a tömege miatt nem léphet túl, akár az, hogy végül vas-atommagokat termel, a végeredmény ugyanaz. A nukleáris tűz kialszik, és nincs semmi, ami a csillagot saját gravitációja ellenében megtartaná kiterjedt állapotában – így hát összeroppan. Méghozzá nagyon gyorsan.

Amikor a csillag összeroppan, akkor fölmelegszik, így a külső részében még megmaradt valamennyi hidrogén elérheti a fúzióhoz szükséges hőmérséklet- és nyomásértéket. Ezért következik be a robbanás, amely a csillag anyagának egy részét kihajítja az űrbe, s ebből az összeroppanó csillag körül egy táguló gáz- és porgömb képződhet.

Néhány látható csillag ebben az állapotban van. A csillag megvilágítja a táguló gázgömböt, mi pedig a peremén látjuk a legvilágosabb-

nak, ahol a szemünk irányában a legvastagabb. Az összeroppant csillag úgy néz ki, mintha füstgyűrű venné körül.

A csillagközi térben levő por- vagy gázfelhőket ködöknek hívják, és ha egy köd bolygópályára emlékeztető csillag körüli gyűrűnek látszik, akkor *bolygószerű* (görögösen: *planetáris*) köd a neve.

Körülbelül 1000 planetáris ködöt ismerünk, amelyek közül a Lant (latin nevén: Lyra) csillagképben levő Gyűrű-köd a leghíresebb.

Minden planetáris köd középpontjában egy nagyon forró kékesfehér csillag található (ilyennek kell lennie egy újonnan létrejött fehér törpének), amelynek sugárzása folyton kifelé tolja a gázhéjat. A héj egyre nagyobbá, vékonyabbá és halványabbá válik, míg csak bele nem olvad a csillagközi térben szétszóródott gázba és porba. Ami úgy 100 000 év után visszamarad, az egy észrevehető köd nélküli fehér törpe – ebben az állapotban van jelenleg a Szíriusz B.

A fehér törpében többé már nem folyik magfúzió, így a továbbiakban nem rendelkezik hőforrással. Ezért aztán nagyon lassan, hosszúhosszú idő alatt kihűl. Végül már túl kevés fényt sugároz ki ahhoz, hogy látható legyen, s *fekete törpe* lesz belőle. A világegyetem még nem elég öreg ahhoz, hogy akár csak egyetlen fekete törpe is kialakulhatott volna.

A KETTŐSCSILLAGOK ÉS AZ ÖSSZEROPPANÁS

Ugye, most már azt hisszük, hogy akár ki is tudnánk találni, mi történik, amikor egy csillagból nóva lesz?

Ha egy vörös óriás összeroppan (latin eredetű szóval: *kollapszust* Szenved), fényfölvillanás keletkezik, ahogyan külső rétegeinek hidrogénje összesűrűsödik. Ez a villanás lenne a nóva? Akkor a robbanás gázt és port is kilövellne – csak hogy ilyet nem láttunk sem a Nova Persei, sem a Nova Aquilae esetében.

Valójában nem ez a helyzet. A pre-nóvak tanulmányozása (az a néhány eset, amelyben ez megtörtént) azt mutatta, hogy ezek nem vörös óriások voltak. Mi több, amikor egy nóva elhalványul és visszatér eredeti állapotába (ez a *poszt-nóva*), nem is fehér törpe lesz belőle. A csillag előtte is, utána is a fősorozatba tartozónak látszik, olyannak, amely valamivel fényesebb és forróbb a Napnál.

E rejtély megfejtéséhez idézzük emlékezetünkbe, hogy a legtöbb csillag kettős rendszer tagja. Ha ez így van, jogos a kérdés: mi történik akkor, ha a kettős egyik tagja befejezi fősorozatbeli életét, yörös óriássá tágul, azután fehér törpévé roppan össze, miközben a párja megmarad fősorozatbeli csillagnak?

Egy kettőscsillag mindkét tagja egyszerre kell hogy keletkezzék. Kettejük közül a nagyobb tömegű hamarabb befejezheti a fősorozaton való tartózkodását, és így a párosból ő ér előbb fehér törpeként véget.

Mégis, a legalaposabban ismert fehér törpe, a Szíriusz B, ellensze-

gül ennek az okfejtésnek. Nem tartozik a fősorozatba, pedig mindössze 1,05-szor nehezebb a Napnál, míg a Szíriusz A, amely még fősorozatbeli, 2,5-szer nagyobb tömegű, mint a Nap. Mivel magyarázható ez a rendellenesség?

Kézenfekvő a következtetés, hogy kezdetben a Szíriusz B tömege volt a nagyobb, ezért ez érte el elsőként a vörös óriás állapotot. Amikor a vörös óriás Szíriusz B összeroppan, tömege jelentős részét kilövelte. Így a Szíriusz B-nek az a hányada, amely végül fehér törpévé sűrűsödött, jelentősen kisebb tömegű volt, mint az eredeti csillag.

Mi több, a Szíriusz A csapdába ejthette a Szíriusz B összeroppanása során kilövellt anyag jó részét, tömege tehát megnövekedhetett az eredetihez képest. (Ez azt is jelenti, hogy a Szíriusz A élettartama fősorozatbeli csillagként komoly mértékben lerövidült.)

Semmi sem mutat arra, hogy a Szíriusz-kettősben valaha is nóva alakult volna ki; viszont kiderült, mennyire fontos, hogy a kettős tagjai közötti tömegátvitelt is számításba vegyük.

Az a nóvakkal kapcsolatos kulcsfontosságú felfedezés, amely a jelenség ma elfogadott értelmezéséhez vezetett, 1954-ből származik.

Ekkorra már gondosan tanulmányozták a poszt-nóvakat, s ennek egyik eredményeként megállapították, hogy sok közülük vibrál: apró, gyors fényváltozásokat mutatnak, teljesen eltérően a normál csillagok állandó fénykibocsátásától. Persze, a csillagászok szerettek volna találni valamit, bármit, ami a poszt-nóvakat megkülönbözteti a közönséges csillagoktól, és ez a vibrálás reményt keltőnek tűnt.

Az egyik megfigyelt csillag a Nova Herculis volt, helyesebben az a csillag, ami a Nova Herculis volt húsz évvel azelőtt, és amelyik ezért a DQ Herculis nevet kapta. 1954-ben *Merle F. Walker* amerikai csillagász észrevette, hogy a vibrálásra egy határozott elhalványulás rakódik rá, amely egy órán át tart, majd egy, az eredeti szintig történő kifényesedés követi. A további megfigyelések azt mutatták, hogy ez az elhalványulás periodikusan, 4 óra 39 percenként következik be.

Kiderült, hogy a DQ Herculis egy, az Alcolhoz hasonló fedési kettős, s ez olyasmi volt, amit senki sem várt. Korábban ezt azért nem vették észre, mert a változás nem volt nagymérvű, a periódus pedig olyan rövid volt, hogy senki sem készült ról a változás ilyen gyors ismétlődésére – így aztán nem is figyelt oda rá senki. Valóban, amikor fölismerték, hogy a DQ Herculis egy kettőscsillag, ez volt az addigi legrövidebb periódusú valamennyi közül.

Ez azt jelenti, hogy a kettős két tagja szokatlanul gyorsan kering

a közös gravitációs középpont körül, amiből viszont az következik,

hogy rendkívül közel vannak egymáshoz. Valóban, a ma rendelkezésre álló legmegbízhatóbb becslés szerint a DQ Herculis két csillagának középpontját alig több mint 1,5 millió kilométer választja el egymástól. Ha mindketten akkorák lennének, mint a mi Napunk, ajdnem összeérnének.

Mindössze egy véletlen egybeesésről lenne szó? Lehetséges, hogy annak a ténynek, miszerint a DQ Herculis egy nagyon szoros kettős, semmi köze ahhoz a tényhez, hogy a közelmúltban nóvává vált?

Más poszt-nóvakat is meg kellett vizsgálni, hátha azok is nagyon közeli kettősök. Walker kollégája, *Robert P. Kraft* tíz megvizsgált poszt-nóva közül hétnél határozott jeleket talált, amelyek nagyon szoros kettősök létre utaltak.

Természetesen túlzás lenne arra számítani, hogy az összes kettős rendszert az éle felől fogjuk látni, amikor is egyikük a másik elé kerülhet, elfedve azt. Azok a poszt-nóvak, amelyeknél semmi jel sem mutat fedésre, a színképvonalak gondos tanulmányozása alapján szintén szoros kettősöknek tekinthetők.

A szélsőségesen szoros kettősök nagyon ritkák, és a nóvak is nagyon ritkák. Hogy ilyen sok csillag van, amely egyszerre nóva is és szélsőségesen szoros kettős is, azt egyszerűen lehetetlen a véletlen egybeesés számlájára írni. Muszáj, hogy kapcsolat legyen közöttük.

Azután fölfedeztek még valamit. A poszt-nóvak közönséges fősorozatbeli csillagoknak néztek ki, csakhogy a színkép alaposabb vizsgálata kis, fehérén izzó csillagok jelenlétét is kimutatta mellettük, amelyek csakis fehér törpék lehetnek. Más szóval a poszt-nóvak mindegyike olyan szélsőségesen szoros kettős, amelynek az egyik tagja egy fehér törpe.

Ezért olyan kicsi a fényességváltozás a fedés során. Amikor a fehér törpe normális párja elé kerül, jóformán semmit sem takar el belőle, így az összfényesség csökkenése kicsi ahhoz az állapothoz képest, amikor mindkét csillag zavartalanul világíthat. Amikor pedig a párja kerül a fehér törpe elé, az egy olyan csillagot takar el, amelynek teljes fényessége, még ha fehérén izzik is, nem valami nagy. Az összfényesség megint csak kevéssé csökken.

A csillagászok kikövetkeztették, minek kell végbemennie egy fehér törpe és egy fősorozatbeli csillag ilyen szélsőségesen szoros kettősében ahhoz, hogy nóva keletkezzék.

Kezdetben a szélsőségesen szoros kettős két fősorozatbeli csillagból áll. A kettő közül a nagyobb tömegű (nevezzük A -nak) végül vörös óriássá válik. Ahogy a vörös óriás tágul, egyszer csak olyan nagy lesz, hogy hozzáér a párjához (legyen ez B), amely befog valamennyit A külső rétegeiből, ezáltal nagyobb tömegűvé, s így rövidebb élettartamúvá is válik. Végül A fehér törpévé roppan össze, míg B folytatja immár megrövidült fősorozatbeli életét.

Nemsokára (mármint a csillagok időszámítása szerint) B kezdi kimeríteni a fúziós üzemanyagot, és kezdetét veszi a tágulás. Mielőtt ez nagyobb méreteket öltene, s mielőtt B teljesen és fölismerhetően vörös óriássá válna, külső rétegei elég közel kerülnek A -hoz, a fehér törpéhez, hogy B anyagának egy része átzúduljon az A gravitációs hatása által uralt tartományba.

Amikor korábban fordítva történt a dolog, akkor A anyaga B felületére csapódott be, mert mindkettő normál csillag volt. Mostazonban B anyaga nem csapódik be A felületére, mivel A fehér törpe és nagyon kicsi. B anyaga ehelyett a fehér törpe körüli pályára áll rá, és egy *akkréciós korongot*

alkot. Ezt azért hívják így, mert a pályán lévő anyag részecskéi, atomjai egyfajta belső súrlódás következtében egymásnak ütköznek, egyes részei energiát veszítenek és süllyedni kezdenek a fehér törpe felé. Ezek a részek lassan, spirálisan haladnak befelé, és a fehér törpe felszínére fokozatosan nagy tömegű anyag érkezik. Ezt a folyamatot nevezik latinosan akkréciónak, azaz gyarapodásnak.

Bár B magjában a hidrogén elfogyott, és a vörös óriás állapot felé tágul, a külső rétegei, amelyek átömlenek A -ba, még mindig majdnem teljesen hidrogénből állnak. A fehér törpe, amelynek még külső rétegeiben is alig van saját hidrogénje, így állandóan gyűjti a párjától származó hidrogént.

A fehér törpe felszínére érkező hidrogént a kis átmérőjű csillag erős felszíni gravitációja összesűriti, ezáltal föl is melegíti. Egyre több és több hidrogén érkezik, s a fűtés egyre folytatódik. Egy idő után a hőmérséklet eléri azt a pontot, ahol a hidrogén egy része fuzionálni kezd, s ettől a fehér törpe felszíne még inkább fölhevül.

Végül elér egy újabb pontra, ahol mind a hidrogén, mind a fehér törpe felszíne olyannyira forróvá válik, hogy az már elegendő egy óriási fúziós reakció begyűjtéséhez az akkréciós korongban. A korong nagy részében megindul a fúzió, hatalmas fényfölvillanást és egyéb sugárzást hozva létre, az akkréciós korong felső rétegeit pedig a fehér törpe gravitációs terén kívülre dobva ki.

Ez az óriási villanás az, amit a Földről nóvaként észlelünk, az akkréciós korong kilökött része pedig az a por- és gázfelhő, amit a poszt-nóva körül látunk tágulni.

A fúziós folyamat fokozatosan elhal, az aktivitás megszűnik, és hosszú idő múltán a fehér törpe felszíne lehül. A ciklus ezután újrakezdődik, ahogy a hidrogén megint ömleni kezd B -ről, újraépítve az akkréciós korongot, amely lassan közeledik A hűlő felszínéhez. Végül bekövetkezik az újabb robbanás. Ily módon a nóvakitörés sokszor megismétlődhet, míg csak a B égítést be nem fejezi a tágulást és készen nem áll arra, hogy fehér törpévé sűrűsödjék. (Ismeretesek olyan kettősök is, amelyek mindkét tagja fehér törpe – ámbár, ha elég távol vannak egymástól, akkor egyiküknek sem lehetett nóvaszerű előléte, hiszen nem alakulhatott ki a szükséges anyagáram egyikőtől a másikig.)

Altalában az első nővarobbanás a legfényesebb, ennek eredményét nevezik időnként *szűz* nóvának. A Nova Persei, a Nova Aquilae és a Nova Cygni szűz nóva lehetett. A második robbanás 20 000 évig is várthat magára és kevésbé fényes. A további ismétlődések egyre kevésbé látványosak.

A fehér törpe maga is belejátszik a nóva-reakció intenzitásába. A felszínén nehéz atommagok találhatóak (úgymint szén, nitrogén és oxigén), s ezekből egy kevés hozzákeveredhet a beáramló hidrogén-

hez. A nehéz magok gyorsítják a hidrogénfúziót. Ha ezekből a nehéz magokból az átlagosnál több kerül a hidrogénbe, akkor a hidrogénhájban a fúzió sebessége különösen fölfokozódik, sokkal fényesebbé téve a kezdeti fölvilanást és persze gyorsabbá az elhalványulást. Ha a szén, a nitrogén és az oxigén viszonylag kis mennyiségben van jelen, akkor a fúzió kevésbé gyorsan gyullad be, így a kezdeti fölvilanás nem lesz annyira fényes, és sokkal lassabban is halványodik el. Ez az oka annak, hogy vannak gyors, illetve lassú nóvák.

A nóva kialakulásának ezek szerint eléggé szigorú föltételei vannak, és nyilvánvaló, hogy a Galaktikában nagyon kevés csillag tesz ezeknek eleget. Ehhez egy kettőscsillag, még hozzá egy szélsőségesen szoros kettős szükségesnek.

A mi Napunk a legkevésbé sem felel meg ezeknek a föltételeknek. Nem tagja egy szélsőségesen szoros kettősnek, sőt tudomásunk szerint semmiféle kettősnek sem tagja. Végül majd úgy ötmilliárd év vagy még hosszabb idő elteltével hidrogénje nagy részét elhasználja, és beindul benne a héliumfúzió. Attól kezdve vörös óriássá fog tágulni, végül pedig fehér törpévé roppan össze – ezt azonban zavartalan egyedülletben, külső beavatkozás nélkül teszi majd. Nóva sohasem lesz belőle.

Még nagyobb robbanások

TÚL A GALAKTIKÁN?

Nem mindegyik nóva fehér törpét tartalmazó szélsőségesen szoros kettőscsillag. Ezer között talán egy akad, amelyik nem ilyen, de ez az egy aztán teljesen más típusú jelenség. Ahhoz, hogy ezeket a kivételeket megértsük, távolabbra kell kitekintenünk a világegyetembe.

Amikor kiderült, hogy az égen látható csillagok egy véges méretű, állandó alakú szerkezet – a Galaktika – részei, a csillagászok többsége biztosra vette, hogy ez a szerkezet az összes vagy majdnem az összes csillagot magában foglalja. Más szóval, hogy a Galaktika maga a világegyetem.

Ugy gondolták, valamennyi égi objektum közül legfeljebb a Magellán-felhők tekinthetők a galaxisunkon kívülieknek. Ezek mélyen a déli égbolton helyezkednek el, s az európai szélességi körökről nem is látszanak.

Az első európaiak, akik látták és 1520-ban leírták őket, a *Ferdinand Magellan* (nevének eredeti, portugál írásmódja: *Fernão de Magalhães*, 1480-1521) vezette, nyugati irányban útnak indult távolkeleti expedíció tagjai voltak. Ahhoz, hogy eljussanak a Távol-Keletre, az expedíciónak (amely végül is először utazta körül teljes egészében a Földet) meg kellett kerülnie Amerikát, ehhez viszont messze délre kellett yitorláznuk, hogy áthaladhassanak a később Magellánról elnevezett tengerszoroson. Azokról a távoli déli szélességekről a Magellán-felhők magasán az égbolton látszanak.

A Magellán-felhők két halyány fényfoltja a Tejút kicsiny, különálló részének tűnik. Mivel különállóak, az is lehet, hogy nem tartoznak abba a galaxisba, amelynek a Tejút, hogy úgy mondjam, a karimája.

Idővel bebizonyosodott, hogy a Magellán-felhők ugyanúgy nagy-»számú, nagyon halvány csillagból állnak, mint a Tejút. Az 1930-as évekre világossá vált, hogy a Nagy Magellán-felhő 47 500 parszek, a Kis Magellán-felhő pedig 50 500 parszek távolságban van tőlünk. Mindkettő jócskán túl van a Galaktika határán.

Azonkívül mindkettő jóval kisebb, mint a Galaktika. Míg a mi

galaxisunkat hozzávetőleg 250 milliárd csillag alkotja, addig a Nagy Magellán-felhőben nem lehet több tízmilliárdnál, a Kis Magellánfelhőben pedig kétmilliárdnál is kevesebb van.

A Magellán-felhőket a Galaktika körül keringő kis bolygó-galaxisoknak tekinthetjük. (Ezekről az egyéb szerkezetektől megkülönböztetendő nevezzük saját galaxisunkat Galaktikának vagy Tejútrendszernek.) Bebizonyítható, hogy a Magellán-felhők utólag váltak valahogyan külön, és a Tejútrendszerrel hármásban alkotnak egy, a gravitáció által összekapcsolt rendszert – ahogy a Föld–Hold rendszerről is beszélhetünk úgy, mint egyetlen egységről.

Önként adódik a kérdés: létezik-e bármi olyasmi, ami kívül van a Tejút-Magellán rendszeren?

Az 1800-as évek néhány csillagásza úgy gondolta, hogy igen. Egyetlen objektumról lehetett ezt föltételezni, amelyik úgy tűnt, hogy nem csillag.

Ugyanis az égen nem csak csillagok és olyan halványan fénylő objektumok vannak, mint a Tejút vagy a Magellán-felhők, amelyeket csillagokra lehet fölbontani. Léteznek egészen másfajta csillagászati objektumok is.

Így *Christian Huygens* (1629-1695) holland csillagász 1694-ben leirt egy fényes, elmosódott objektumot, amely szabad szemmel csillagnak látszik, még hozzá a középsőnek abból a háromból, amelyekbe a nép képzelőereje az égen az Orion csillagképpel ábrázolt óriás vadász kardját látta bele. A távcső viszont fényes ködnek mutatta, ami félig-meddig eltakarja a körülötte levő csillagokat.

Erről a csillagászok szinte kezdettől elhitték, hogy pontosan az, aminek látszik: köd, hatalmas por- és gázfelhő, amelynek fénye a benne világító csillagoktól származik. Az Orion-köd nevet kapta; ma már tudjuk, hogy átmérője körülbelül kilenc parszek, és mintegy 500 parszeknyire van tőlünk. Földi mértékkel mérve ritka és nagyon finom köd, jobb vákuum, mint ami laboratóriumban előállítható, mégis elég sok részecske esik a szemünk irányába ahhoz, hogy elhomályosítsa a belsejében lévő csillagokat.

Más fényes ködök is láthatók az égen, s nem egy közülük formára és színre igen szép. Nem csak a Galaktikában található: a Nagy Magellán-felhőben van például a Tarantella-köd, amely sokkal nagyobb az Orion-ködnél.

Vannak egészen sötét ködök is. *William Herschel*nek a Tejút alapos tanulmányozása során feltűnt, hogy egyes területeken alig néhány csillag látható, esetleg egyetlenegy sem. Ezt kétségbeesés véve föltételezte, hogy az ilyen tartományokban egyáltalán nincsenek csillagok, a Föld pedig úgy helyezkedik el, hogy belelátunk ezekbe az üres tartományokba, mint valami alagútba. „Égi lyukakként” írta le ezeket a területeket.

1919-ig már 182 ilyen sötét foltot jegyeztek fel, az viszont nagyon valószínűtlennek tűnt, hogy a zsúfolt Galaktikában ennyi lyuk legyen, és mind épp a Föld felé irányuljon. *Edward Emerson Barnard*

(1857-1923) amerikai és *Maximilian F. J. C. Wolf* (1863-1932) német csillagász az 1890-es években egymástól függetlenül azt állította, hogy ezek ködök, amelyeknek az Orion-ködtől és a hozzá hasonlóktól eltérően nincs fényük, mivel történetesen nincs olyan csillag a belsejükben, amely megvilágítaná a porrészecskéket.

Ezek a sötét ködök csak azért érzékelhetők, mert sűrű csillagmezők irányába esnek. A ködök eltakarják a csillagokat, és szabálytalan árnyékoknak látszanak.

A csillag nélküli sötét ködökön, illetve a csillagokat tartalmazó fényeseken kívül még más típusúak is láthatók az égen. Van néhány, amely egyik osztályba sem tartozik, és elég rejtélyesen néz ki. Közülük a legjellegzetesebb és legfényesebb (az egyetlen, amely szabad szemmel is látható) egy halvány, némileg elmosódott, 4-es magnitúdójú „csillag”. Az Androméda csillagképben található, és már az arab csillagászok is észrevették.

Simon Marius (1573-1624) német csillagász figyelte meg elsőként távcsővel 1611-ben, ezért többnyire őt tekintik az Androméda-köd fölfedezőjének.

Charles Messier (1730-1817) francia csillagász az üstökösöket vadászta buzgón, amelyek csak egy-egy időre tűnnek föl: megjelennek, tovahaladnak a csillagos háttér előtt, végül eltűnnek. 1871-ben katalógusba foglalta azokat az elmosódott égi objektumokat, amelyek nem üstökösök, hanem az égbolt állandó lakói, és a csillagokhoz viszonyított helyük változatlan. Célja az volt, hogy a többi üstökös vadász semmiképp se téveszthesse össze őket az üstökösökkel. Az Androméda-köd a harmincegyedik helyen szerepelt a listán, ezért időnként M 31 néven is emlegetik.

Az Androméda-ködot az teszi rejtélyessé, hogy nem sötét, hanem fénylik. Azt viszont nem lehetett tudni, hogy mi okozza a fényességet, mivel a belsejében nincs csillag, ami fényt szolgáltatna. Egy por-és gázfelhő, amely csillag nélkül világít, eléggé rendellenes dolognak tűnik.

A Messier-katalógus további csillag nélküli fényes ködfoltokat is tartalmazott. Egyeseket közülük sikerült csillagokra fölbontani; *Herschel* például több Messier-objektumról kimutatta, hogy azok a csillagok sűrű *gömbhalmaizai*. Vannak azonban közöttük másfélék is.

Ha az Androméda-köd rejtélyét sikerül megfejteni, akkor ugyanez föltehetően a többi kisebb, kevésbé feltűnő ködre is érvényes lesz. Mi hát az Androméda-köd?

Két, teljesen eltérő típusú magyarázat született még az 1700-as évek vége előtt.

- Az első szerint az Androméda-ködben azért nem látunk csillagot, mert bár a ködöt (akárcsak a Tejút vagy a Magellán-felhőket) teljes egészében csillagok alkotják, nem pedig por, azok túl halványak ahhoz, hogy láthatók legyenek.

Csak hogy az Androméda-köd föltételezett csillagainak szerfölkött

gyenge fényűeknek kéne lenniük, ha egyszer a távcső sem tudja halvány csillagok sokaságára fölbontani, mint a Tejút és a Magellán-felhők ködét.

Az Androméda-köd a legerősebb mai távcsövekben is köd marad.

Legésszerűbbnek az a magyarázat látszott, amely szerint az Androméda-köd annyira messze van, hogy még a távcső sem elég az öt alkotó csillagok érzékeléséhez, mivel csillagai sokkal halványabbak az olyan közelebbi objektumokénál, mint a Tejút és a Magellánfelhők. Márpedig ha az Androméda-köd mérhetetlenül messze van, és mégis látható szabad szemmel, akkor valóban gigantikus méretűnek kell lennie.

Ezen a véleményen volt *Immanuel Kant* (1724-1804) német filozófus, aki 1755-ben fölvetette a „sziget-univerzumok” létezését. S amikor végül tudomást szereztek a Galaktika létéről, kézenfekvő volt a föltételezés, hogy Kant „sziget-univerzumai”, ha léteznek, csupán további, nagyon távoli galaxisok.

Kant nézetei megelőzték korukat. A csillagászok még másfélszáz évig nem voltak fölkészülve arra, hogy túltekintsenek a Galaktikán, és más galaxisok létezését is el tudják képzelni. Kevésbé fantasztikusnak, ezért elfogadhatóbbnak tűnt a másik álláspont, amelyet *Pierre-Simon de Laplace* (1749-1827) francia csillagász fejtett ki 1798-ban. Eszerint a Naprendszer kezdetben hatalmas, forgó gáz- és porfelhő volt, amely lassan sűrűsödni kezdett, miközben kisebb por- és gázgyűrűket dobott le magáról – ezekből lettek a bolygók. Amint a felhő összesűrűsödött, a belseje annyira fölforrósodott, hogy fényleni kezdett, megvilágítva azt az egész por- és gáztartományt, amelyben a bolygók formálódtak. Más szóval a külső részből lettek a bolygók, a központi tartományból pedig a Nap.

Hasonló ötletet vetett föl Kant is a „sziget-univerzumokról” szóló könyvében. Laplace viszont nagyobb részletességgel tárgyalta a dolgot, mondván, az Androméda-köd nem más, mint egy keletkezőben levő bolygórendszer. Ezek szerint az Androméda-köd valóban egy gáz- és porfelhő, de a középpontját egy csillag alkotja, amely épp csak kezd világítani, így ő maga még nem látható, viszont az egész környezetet bevilágítja. Laplace elképzelését, mivel az Andromédaködöt hozta föl példaként, „köd-hipotézisnek” hívjuk.

Ha Laplace-nak van igaza, és az Androméda-köd egy magában álló bolygórendszer, akkor meglehetősen közel kell lennie, hogy ekkorának lássuk, és bizonyára része a Galaktikának.

Az 1800-as években Laplace véleménye volt az általánosan elfogadott. Nagyon kevesen álltak Kant pártjára, ha egyáltalán akadt ilyen csillagász.

Az 1800-as években az Androméda-köd mindinkább vesztett kivételességéből. Ahogy egyre jobb és jobb távcsövekkel fürkésztek az eget, kiderült, szép számmal található olyan ködök, amelyek fényesek ugyan, de csillagoknak nyoma sincs bennük.

Egy ír csillagász, *William Parsons* (Rosse harmadik earlje, 1800–

1867) volt az, aki megkülönböztetett figyelmet szentelt ezeknek a ködöknek, s aki a világ akkori legnagyobb távcsövét építette meg vizsgálódásai számára. A távcsőnek szinte semmi hasznát sem tudta venni, mert a birtokán annyira rossz volt az időjárás, hogy jóformán soha nem folytathatott megfigyeléseket. Hébe-hóba azért adódott némi lehetőség a ködök tanulmányozására, és 1845-ben fölfigyelt rá, hogy egy részüknek jól kivehető spirális szerkezete van: szinte apró fényörvényeknek látszottak az úr fekete hátere előtt.

A leglátványosabb közülük az M 51, a Messier-katalógus ötvenegyedik tagja, amelyik úgy néz ki, mint egy szélkerék, s amely ezért hamarosan Örvény-köd néven vált ismertté. A csillagászok úgy kezdték a *spirális* ködöket emlegetni, mint az égi objektumok egy külön osztályát.

Vannak ellipszis alakú ködök is, spirális karok nélkül, ezeket *elliptikus* ködöknek hívják. Mind a spirális, mind az elliptikus ködök jellegzetesen különböznek az olyanoktól, amelyek, mint az Orion is, szabálytalan, szálas alakúak.

Az 1800-as évek második felére lehetővé vált lefényképezni az égi objektumokat, beleértve a halványakat is. A fényképezőgépet a távcsőhöz szokták rögzíteni, amely automatikusan együtt mozog az égbolttal, hogy semlegesítse a Föld tengely körüli forgását. Így hosszú expozíciós idejű fényképek is készíthetők.

Az 1880-as években *Isaac Roberts* (1829-1904) walesi amatőr csillagász számos fotográfiát készített ködökről. Ez fontos volt, hiszen a fényképezőgép objektívében látja és rögzíti a részleteket. A csillagászok immár nem voltak kénytelenek kizárólag azoknak a megfigyelőknek az olykor kétes művészi képességeire hagyatkozni, akik megpróbálták lerajzolni a látottakat.

1888-ban Roberts ki tudta mutatni, hogy az Androméda-ködnek spirális szerkezete van. Ezt korábban azért nem vették észre, mert az Androméda-ködöt sokkal inkább az éle felől látjuk, mint az Örvény-ködöt. Az utóbbinál oly jól kivehető spirális alak ezért az előbbinél nehezebben fedezhető föl.

Roberts még valamire fölfigyelt. Ha a ködöket többéves időközökben újra meg újra lefényképezte, a környező csillagokhoz viszonyítva kis eltérések mutatkoztak, mintha a köd észrevehető sebességgel forogna. Ez nem jelenthetett mást, mint hogy a köd viszonylag kicsiny méretű és így viszonylag közeli is. Ha valami olyan messzeségben van, mint a Kant-féle sziget-univerzumok, annak annyira hatalmasnak kellene lennie, hogy egyetlen fordulata több millió évig tartana, és bármilyen hosszú ideig figyelni is, semmilyen mérhető változást sem észlelnénk. 1899-ben Roberts azt állította, hogy fényképei valóban mutatják ezeket a forgásból adódó változásokat az Androméda-ködben – és tényleg így is látszott.

Ugyancsak 1899-ben vették föl első ízben az Androméda-köd színképét. Ez nagyon hasonlított ahhoz, amelyet általában a csillagokról szoktunk kapni; a szabálytalan por- és gázfelhőké viszont,

mint az Orion-köd is, teljesen eltér a csillagokétól, és általában sok különböző színű, magában álló fényes vonalat tartalmaz. Ezért van, hogy az Orion-köd és a hozzá hasonlók gyakran pompás színűek, az Androméda-köd és társai viszont fehérek — ezért nevezik őket időnként *fehér* ködöknek is.

Az Androméda-köd színe könnyen értelmezhető, ha Laplace-nak volt igaza, és a köd egy most keletkező csillag. Valóban, *William Huggins* (1824-1910) angol csillagász 1909-es vizsgálódásai azt látszottak igazolni, hogy az Androméda-köd egy létrejöttének előrehaladott szakaszában levő bolygórendszer.

Úgy tűnt, egyszerűen nincs helye vitának. És mégis, egy, a század végén fölbukkant nehézség makacsul gátolta a továbhaladást. És ez a nóvával is összefüggött.

AZ S ANDROMEDAE

1885. augusztus 20-án *Ernst Hartwig* (1851-1923) német asztronómus egy csillagra lett figyelmes az Androméda-köd középső részén — az elsőre ebben a ködben.

A csillagászok egy része először bizonyára arra gondolt, hogy a keletkezőben levő bolygórendszer, aminek az Androméda-ködöt gondolták, végül is elérte fejlődésének tetőpontját. A központi rész már nemcsak izzik, hanem végre tüzet fogott és „felőtt” csillag lett belőle. Ha valóban ez történt, akkor a csillagnak fényesnek is kellett volna maradnia, és tartósan az égboltra rögzítve kellene látnunk —csak hogy nem ez a helyzet.

A csillag lassan halványodni kezdett, és 1886 márciusában végleg eltűnt. Tévedés kizárva: nyilvánvalóan egy nóva volt — a Nova Andromedae. „S Andromedae”-ként szoktak rá hivatkozni, én is ezt a nevet fogom használni.

De mit keres egy nóva az Androméda-ködben? Lehet-e nóva egy magában álló, keletkezőfélben lévő csillagból, mielőtt valódi csillaggá vált volna? Ha pedig valóban ez történt, akkor hogyan maradhatott az Androméda-köd a nóva elhalványulta után is olyan, mint volt, bármiféle észrevehető változás nélkül?

S ki a megmondhatója, hogy a nóva tényleg részét alkotta-e az Androméda-ködnek? Lehet, hogy egyszerűen ugyanabba az irányba esett, amelyben a ködöt látjuk, de jóval előtte yillant föl, teljesen függetlenül a ködtől.

Része a ködnek vagy sem, az S Andromedae mindenesetre nagyon gyöngécske volt ahhoz, hogy nóva lehessen. Jóllehet akkoriban a csillagászok nagyon ritkán láttak nóvát, annyit azért csak láttak, hogy tudják, az S Andromedae szokatlanul halvány. Még legfényesebb szakában is csak 7,2-es magnitúdót ért el, úgyhogy szabad szemmel sohasem volt látható. Senkivel sem fordulhatott elő, hogy kilép a kapun, meglátja az S Andromedae-t az égen, földre- gyökere-

zik a lába és ezt mondja magában: „Hihetetlen! Egy új csillag!” —ahogy az háromszáz évvel azelőtt Tychóval történt.

Az S Andromedae-t senki sem észlelte néhány, műszerekkel fől-szerelkezett csillagáson kívül. Valószínűleg ők sem veszik észre, ha nem az Androméda-köd jellegtelen középső részében világít, ahol mindaddig még egy halvány csillagocská sem volt kivehető.

Az Androméda-ködről készült fényképek kimutatták, hogy egy nóva fénylett föl benne; a spektrumát viszont nem vették föl. Akkoriban még nem volt könnyű színeképet készíteni halvány objektumokról. Az S Andromedae gyors fölvilágása és lassú elhalványulása egyértelműen nóvára vallott, egyedül az volt a kérdés, hogy miért olyan halvány.

Ez sem tűnt azonban rettenetesen komoly problémának. Végére is a nóvák fényessége tág határok között változik. A tetőponton lehetnek rendkívül fényesek, mint a Tychóé volt, de lehetnek alig észrevehetőek, mint az, amelyet Hind 1848-ban látott, s amely legfőljebb 4-es magnitúdójú volt. A Nova Andromedae pusztán keyésbé volt kivehető, és kész.

Mivel akkortájt még semmit se tudtak sem a nóvák természetéről, sem létrejöttük okairól, azzal lehetett érvelni, hogy minden attól függ, mekkora volt az eredeti csillag fényessége. Egy különösen fényes csillag hihetetlen mértékben képes fölragyogni; egy keyésbé fényes csak mérsékeltebben ragyog; egy nagyon halvány pedig még a nóva-főlvilágás csúcán sem yálík észlelhetővé pusztá szemmel.

Ezzel aztán napirendre is tértek az S Andromedae fölött. Megjelent és eltűnt, tudomásul yették és elfelejtették.

De csak 1901-ig. Akkor megjelent a Noya Persei, és egy darabig 0-ás magnitúdójú csillagként világított. Abból, ahogyan a fény a körülötte lévő porgyűrűben terjedt, a csillagászok ki tudták számítani, milyen távol van a Nova Persei. Hiszen megfigyelhető volt a fény látszólagos sebessége, a yalódi sebességét pedig ismerték, így nem volt nehéz meghatározni, mekkora távolságban mozog a fény a látott módon. Arra a következtetésre jutottak, hogy a Nova Persei harminc parszeknyire yan a Földtől.

Ez, csillagról lévén szó, nem igazán nagy távolság. Lehet, hogy pár ezer csillag ennél is közelebb van, sok milliárd viszont távolabb. Fölmerült hát az a gondolat is, hogy a Nova Persei nagy fényességének egyedül a közelsége az oka.

Lehet, hogy minden nóva többé-kevésbé ugyanolyan fokú luminozitást (abszolút fényrendet) ér el, és látszólagos fényességük eltérő olta kizárólag az eltérő távolság következménye?

Tegyük föl például, hogy az S Andromedae azért mutatott mindssze 7,2-es magnitúdót, mert messzebb volt, mint a Nova Persei! Ha két nóva abszolút fényessége a csúcson azonos volt, akkor az Andromedae-nak körülbelül 500 parszekre kellett lennie, hogy a úcsponjtján is ennyire halványnak látsszon.

Ha ez így van, akkor az Androméda-ködnek 500 parszeknyire kell

lennie, föltéve, hogy az S Andromedae beletartozik. Ha viszont az S Andromedae csupán a köd elé esik, akkor az Androméda-köd messzebb (és talán sokkalta messzebb) kell hogy legyen ennél az 500 parszeknél.

Ha az Androméda-köd nincs is távolabb 500 parszeknél, még akkor sem lehet egy magában álló, keletkezőben levő bolygórendszer. Egyetlen ilyen sem látszhatna ugyanis 500 parszek távolságból akkora nagy az égen, mint ez a köd.

A csillagászok nem fogadták el ezt az érvelést, amely végső soron azon a föltételezésen alapult, hogy a Nova Persei és az S Andromedae luminozitásának ugyanakkora volt a csúcserőteke. Egyszerűbb volt azt föltételezni, hogy különböző luminozitásúak voltak a tetőponton, és hogy az S Andromedae nem pusztán nagyon halványnak látszott a Nova Perseihez képest, hanem valóban az is volt. Az S Andromedae így a csillagok viszonylatában elég közel lehetett, sokkal közelebb, mint 500 parszek, és ugyanez vonatkozik az Androméda-ködre is.

S ebben az esetben az Androméda-köd még mindig lehet egy kialakulóban levő bolygórendszer.

AZ ANDROMÉDA-GALAXIS

Egy amerikai csillagász, *Heber Doust Curtis (1872-1942)* nem fogadta el ezt a kényelmes kibúvót. Tegyük föl, hogy az S Andromedae is, az Androméda-köd is messzebb van, méghozzá sokkalta messzebb, mint hittük! Nem lehetséges, hogy az Androméda-köd olyannyira távol van, hogy Kant másfél évszázaddal korábbi ötlete bizonyul helyesnek, vagyis az Androméda-köd egy „sziget-univerzum”, egy csillagokból álló, független galaxis, jóval kívül a miénken?

Ha így van, akkor az Androméda-köd nagyon-nagyon sok és nagyon-nagyon halvány csillagból kell hogy álljon. Ezek között időnként növőknak kell föllángolniuk. A csillagokat ugyan még a legélesebb távcsövekkel sem lehet kivenni az Androméda-ködben, de ha egyikük növőként ragyog föl, az távcsővel láthatóvá, sőt akár az S Andromedae-nél is jobban láthatóvá válhat.

1917-től Curtis valóban tucatszám fedezett föl növőkat az Androméda-ködben. Az, hogy növőkről van szó, nem volt kérdéses, mivel előbb láthatóvá váltak, azután elhalványodtak, majd később újabbak váltak láthatóvá és azok is elhalványodtak.

Ez a növőtömeg két szempontból érdekes. Az egyik az, hogy tömegével jelentkeztek. Sehol másutt az égbolton nem akadt ennyi növő egyetlen körülhatárolt területen.

Ez azt jelenti, hogy nem véletlenül látszanak az ég egy bizonyos irányában, függetlenül a ködtől, amely történetesen éppen mögéjük esik. Ha így lenne, akkor miért kizárólag ebben az irányban látszana ennyi? Hogyan is tulajdoníthatnánk a véletlennek, hogy ez a párat-

lan növő-gyülekezet és az Androméda-köd ugyanabban az irányban van, bármiféle kitapintható összefüggés nélkül! Curtis biztosra vette, hogy a növők a köd belsejében vannak.

De miért vannak ennyien? Nos, ha az Androméda-köd egy sziget-univerzum, egy teljes galaxis, akkor ugyanolyan sok csillagból állhat, mint a mi Galaktikánk. Ezért ugyanolyan sok növő lehet benne (még akkor is, ha nekünk csupán egyetlen apró fényfoltnak tűnik), mint a mi Galaktikánkban, amely az égbolt összes többi részét kitölti.

Sőt, az Androméda-ködben egyenesen több látható, mint a Galaktikában. Curtis ugyanis azt vette észre, hogy az Androméda-köd perem mentén sötét foltok vannak, amelyek, ha tényleg egy galaxisról van szó, valószínűleg nagy kiterjedésű sötét ködök, gáz- és porfelhők, amelyek eltakarják a mögöttük levő csillagokat.

Márpedig ugyanez a Galaktikával is megeshet. Ráadásul a Tejt apró sötét foltjain kívül sokkal nagyobbak is létezhetnek, amelyekről semmit sem tudunk (idővel bebizonyosodott, hogy ez így is van), ezért lehet, hogy a Galaktika egész övezetei maradnak számunkra teljesen láthatatlanok. E láthatatlan (a láthatókénál sokkal nagyobb létszámú) csillagtömegben évente sok-sok növő maradhat észrevétlen a porfelhők függőnye mögött. Az Androméda-köd esetében viszont abban a kedvező helyzetben vagyunk, hogy oldalirányból elláthatunk a porfelhők mellett, úgyhogy nem sok növő bújhat el előlünk.

És tényleg: az Androméda-ködben több növőt láttak, mint az égbolt egész fönnmaradó részén.

Az Androméda növőinak másik érdekessége rendkívül hálvány voltak. Még a legfényesebb állapotukban és a legerősebb távcsövekkel is épp hogy láthatók.

Ha az olyan szokásos növőkhöz hasonlítanak, mint például a Nova Persei, akkor azért ilyen egyedülállóan gyöngék, mert rendkívüli távolságban vannak. Ez teljesen összhangban van azzal a koncepcióval, hogy az Androméda-köd egy önálló galaxis.

Curtis meg volt győződve erről, és vállalta a sziget-univerzumok fogadatlan prókátorának szerepét.

De nem csak ő járta a maga tját. Az elképzelést nehéz volt elfogadtatni, különösen mivel újabb éryek merültek föl amelleit, hogy az Androméda-köd valójában közeli objektum. *Adriaan van Maanen (1884-1946)* holland-amerikai csillagászt főleg a csillagászati objektumok kisméretű elmozdulásai foglalkoztatták, beleértve -számos spirálköd mozgását is. Van Maanen megerősítette Roberts korábbi megfigyeléseit az Androméda-köd mérhető forási sebességéről. Sőt, közleménye szerint ez nemcsak az Andromédára, hanem számos más spirálködre is éryényes.

Ma már tudjuk, hogy van Maanen mérései valamilyen okból hibásak voltak. Olyan kis elmozdulásokat mért, amelyek épp csak hogy belül estek műszerei éryekelőképességén, és vagy ezekkel a

műszerekkel volt valami baj, vagy pedig az a szilárd meggyőződése befolyásolta megfigyeléseit, hogy muszáj észlelhető forgásnak lennie.

Van Maanen azonban kiváló hírnévnek örvendett, amire egyébként rá is szolgált, ezért könnyű volt hinni neki. Márpedig ha az Androméda-ködnek észrevehető mozgása van, akkor közel kell lennie, tekintet nélkül a csaknem láthatatlan növőák tömkelegéről szóló, kétes értékű beszámolókra.

A vitába többek között *Harlow Shapley* (1885-1972) amerikai csillagász is bekapcsolódott. Shapley akkoriban kezdett távolságokat mérni cefeida változók segítségével, a *Henrietta Swan Leavitt* (1868-1921) amerikai csillagász által 1912-ben kidolgozott technikával. Ezzel a módszerrel ki tudta mutatni, hogy a Galaktika tulajdonképpen középpontja a Naprendszerből távol van, Földünk pedig a Galaktika külső övezetében esik. Ő határozta meg elsőként a Galaktika ma is elfogadott méreteit, amelyeket addig mindenki alábecsült. Sőt, igazából Shapley becslése eredetileg túl magas is volt. Ugyancsak ő volt az első, aki meghatározta a Magellán-felhők távolságát.

Azt hinnék, hogy Shapley, aki példátlanul megnyújtotta a Galaktika és közvetlen környezete közötti távolságot, azt is el tudta képzelni, hogy más objektumok még messzebb legyenek. Csakhogy van Maanen közeli barátja volt, és elfogadta az ő eredményeit. Így aztán ő lett a „kis-univerzum” felfogás vezéreképviselője. Véleménye szerint a mindenség a Galaktikából és a Magellán-felhőkből áll, s a különböző fehér ködök csupán ezek részei.

1920. április 26-án Curtis és Shapley nyilvános vitát tartott erről az Amerikai Tudományos Akadémia zsűfórájára. Kétségkívül Shapleynek volt nagyobb hírneve és ő képviselte a többség véleményét, ám Curtis váratlanul hatásos előadónak, növőái pedig, halvány voltukkal és nagy számukkal, meglepően erős érvek bizonyultak.

Objektíve a vita eldöntetlenül végződött, de maga az, hogy Curtis ilyen döntetlent tudott elérni, meghökkenítő erkölcsi győzelemmel ért föl. Így aztán az a vélemény kezdett elterjedni (különösen az utólagos bölcsesség fényében), hogy a vitát ő nyerte meg.

Valójában a vita nem döntötte el végleg a kérdést, bár számos csillagász tért át a „sziget-univerzum” hitre. További tapasztalati adatokra lett volna jó valahogyan szert tenni – olyanokra, amelyek az összes addiginál meggyőzőbbek.

Edwin Powell Hubble (1889-1953) volt az az amerikai csillagász, aki ilyenekkel szolgált. Neki egy új, óriási távcső állt rendelkezésére két és fél méter átmérőjű tükörrel – akkoriban ezzel lehetett a legmesszebb ellátni a világon. 1919-ben vették használatba, Hubble pedig 1922-ben kezdett vele hosszú expozíciós idejű fényképeket készíteni az Androméda-ködről és a többi hasonló űrbeli objektumról.

1923. október 5-én az egyik fényképen egy csillagot talált az Androméda-köd szélén. Nem növőa volt, hanem, amint éjszakáról

éjszakára követte kiderült, egy cefeida változó. 1924 végére Hubble harminchat nagyon halvány változócsillagot fedezett föl az Androméda-ködben, köztük tizenkét cefeidát. Talált továbbá hatvanhárom növőát is, jóval többet, mint amennyit annak idején Curtis észlelt.

Lehetséges az, hogy ezek a csillagok mind-mind függetlenek lennének az Androméda-ködtől, és csak valahogy véletlenül esnek ugyanabba az irányba? Semmiképpen sem! Hubble, akárcsak Curtis, úgy vélte: ennyi nagyon halvány cefeida változó nem lehet pusztán véletlenségből az Androméda-köd irányában. Ilyen nagy számban az égbolt egyetlen más hasonló darabkáján sem fordulnak elő.

Hubble érezte, hogy az Androméda-ködot alkotó csillagokat látja, ami korábban egyetlen csillagásznak sem sikerült. Neki azért sikerülhetett, mert birtokában volt a legjobb távcső, amely az összes addigit túlszárnyalta.

A Hubble által levont következtetésekhez nem férhetett kétség. Amint az Androméda-ködot sikerült fölbontani csillagokra (csak a néhány legfényesebbre, de ez is elegendő volt), az a korábbi elképzelés, hogy a köd egy közeli objektum, egy keletkezőben levő bolygórendszer, végképp a múlté lett.

Sőt, miután Hubble az Androméda-ködben fölfedezte a cefeida csillagokat, a távolságát is meg tudta határozni Leavitt és Shapley módszerével. Számításai azt mutatták, hogy 230 000 parszeknyire van, körülbelül ötször távolabb, mint a Magellán-felhők. Az Androméda-köd nyilvánvalóan messze kívül esik a Galaktikán, s kétségkívül egy teljes jogú galaxis.

Egy ideig a különféle fehér ködöket *extragalaktikus* ködöknek is nevezték, de végül is a „köd” megjelölést mint teljesen alkalmatlant elvetették. Egyszerűen *galaxisoknak* kezdték őket hívni; az Androméda-köd „Androméda-galaxis” lett, és a mai napig is az maradt. Ugyanígy lett az Örvény-ködből „Örvény-galaxis”, és így tovább.

A kegyelemdöfést a „kis-univerzum” hitnek Hubble adta meg 1935-ben, amikor kimutatta, hogy van Maanen észleletei az egyes galaxisok mérhető forgási sebességéről hibásak voltak.

A többi fehér köd pedig, amelyek az Andromédánál kisebbnek és halványabbnak látszanak, ugyancsak mind galaxisok, s általában távolabbiak, sőt némelyikük sokkal távolabbi, mint az Androméda. A világegyetemet azóta óriási galaxishalmaznak tekintjük, amelyben a mi Tejútunk csupán egy a sok közül.

Ami azt illeti, Hubble még alá is becsülte az Androméda-galaxis távolságát (és így persze a többiét is). 1942-ben *Walter Baade* (1893-1960) német-amerikai csillagász kimutatta, hogy a cefeida változóknak két fajtájuk van, amelyeket különböző módon kell alkalmazni a kozmikus távolságok megállapításában. Shapley volt az, aki megfelelő módon alkalmazva őket, meghatározta Galaktikánk méreteit és a Magellán-felhők távolságát.

Hubble azonban tudtán kívül a másik módon alkalmazta őket az

Androméda-galaxis távolságának megbecslésekor, ezért aztán számításai hibásak voltak. A korrekciót végrehajtva kiderült, hogy az Androméda-galaxis 700 000 parszekre van tőlünk, tizennégyszer távolabb, mint a Magellán-felhők.

SZUPERNOVÁK

Minden megfejtés újabb rejtvényeket ad föl. Ha egyszer a csillagászok abban egyeztek meg, hogy az az Androméda-beli ködös folt egy rendkívül távoli galaxis, újból szemügyre kell yennünk az S Andromedae-t, amely azt a kisebbfajta kayarodást okozta még 1885-ben.

Annak idején, ugye, úgy szólt az okfejtés, hogy ha az S Andromedae luminozitása ugyanakkora lenne, mint a Nova Perseié, akkor körülbelül 500 parszekre kellene lennie ahhoz, hogy fényessége a csúcsponton se haladja meg a 7 magnitúdót. De mi a helyzet, ha olyan messze van, mint amekkorának az Androméda-galaxis távolságát ma hisszük?

Ha az Androméda-galaxis 230 000 parszekre lenne, ahogyan Hubble eleinte becsülte, akkor az S Andromedae-nak körülbelül 200 000-szer akkora luminozitásúnak kellett volna lennie, mint a Noya Perseinek ahhoz, hogy ilyen távolságból 7-es magnitúdójú fényességet érjen el. Mivel az Androméda-galaxis yalójában 700 000 parszekre van tőlünk, az S Andromedae-nak körülbelül kétmilliósorosan kellett fölülmúlnia a Nova Persei csúcstértékét, yagyis körülbelül húszmilliárdszor akkora luminozitással kellett rendelkeznie, mint amekkorá a Napé.

Ma már tudjuk, hogy az Androméda-galaxis tömege mintegy kétszerese a mienkének, yagyis körülbelül akkora, mint 200 milliárd Napunkhoz hasonló csillagé. Összesített luminozitása nagyjából 100 milliárd Nap-szerű csillagénak felel meg (föltéye, hogy a csillagok többsége jóval halványabb a Napnál). Ha az S Andromedae csúcsponti luminozitása húszmilliárdszor akkora yolt, mint a Napé, akkor ez azt jelenti: abszolt fényereje egyötödét tette ki annak az egész óriási galaxisénak, amelyben yolt.

Ha ez így van, akkor az S Andromedae-t nem tekinthetjük egyszerűen e^{gy} nóvának a sok közül. Körülbelül egymilliósor, sőt lehet, hogy kétmilliósor yolt intenzívebb, mint a nóyák általában.

A legtöbb csillagásznak azonban nehezére esett megrágni ezt az információt. A „nagy-uniyerzum” eszméjének makacs ellenzői azzal érveltek: ugye, hogy az Androméda-köd nem lehet egy távoli galaxis, hiszen akkor az S Andromedae-nak lehetetlenül fényesnek kellett volna lennie.

Mások arra a keyésbé harcias álláspontra helyezkedtek, hogy azok a Curtis és Hubble által észlelt rendkíyül halvány nóvák ugyan yalóban az Androméda-galaxisban yoltak, az S Andromedae viszont nem. Szerintük az Androméda-köd távolságának ezredrésze-

nél is jóval közelebb, mindössze 500 parszeknyire lehetett – ahogy korábban már kiszámolták –, ezért látszott sokkal fényesebbnek az Androméda többi nóyájánál. Csak véletlenségből esett éppen az Androméda-galaxis irányába. Ha csupán egyetlen nóva illetén föl-fényléséről van szó, azt nyugodt lélekkel a véletlen számlájára írhatjuk.

Hubble egyáltalán nem értett ezzel egyet. Továbbra is szilárdan hitt abban, hogy az S Andromedae egy, az Androméda-galaxisba tartozó, abnormálisan fényes nóva yolt.

Ki tud itt dönteni?

Fritz Zwicky (1898-1974) svájci csillagász a következőképpen okoskodott. Tegyük föl, hogy az S Andromedae valóban abnormálisan nagy luminozitással rendelkezett! Az efféle tünemény valószínűleg nagyon ritka, és az emberiség közös tapasztalata szerint egy olyan jelenség, amely valamilyen eléggé szokásos dolognak a szélsőséges változata, durván a szélsőségességével arányosan ritka. Ezért időpocsékolás lenne az Androméda-galaxist lesni egy újabb S Andromedae-szerű nóva fölfedezése reményében. Viszont már annyi galaxist ismerünk, hogy valamelyikükben egy-egy abnormális luminozitású nóva egyáltalán nem mehet ritkaságszámba. Sőt, miyel egy ilyen abnormálisan erős nóva majdnem olyan fényes, mint az az egész galaxis, amelybe tartozik, az észlelés sem jelenthet problémát. Egy S Andromedae típusú nóvának bármilyen távoli galaxisban is láthatónak kell lennie, ha a galaxis maga látható.

Ténylegesen az S Andromedae óta huszonegy nóvát észleltek a galaxisoknak tartott objektumokban, illetve körülöttük. Ahhoz mindegyikük túl halvány yolt, hogy pusztá szemmel láthatók legyenek (s ennek így is kellett lennie, ha egyszer távoli galaxisokban yoltak), így nem is igen foglalkoztak yelük. Zwicky viszont épp azt találta meg bennük, amit keresett.

1934-ben, mindössze ötven évvel azelőtt, hogy ezeket a sorokat írom, Zwicky szisztematikusan keresni kezdte azokat, amiket ma a szupernóva névvel illetünk; a kifejezés is tőle ered. A Szűz (latin nevéen: Virgo) csillagképben található nagy kiterjedésű galaxishalmazra összpontosított, és 1938-ig nem kevesebb, mint tizenkét szupernóyát talált ennek a halmaznak hol egyik, hol másik galaxisában. A tetőponton mindegyik majdnem olyan fényes yolt, mint a teljes galaxis, és mindegyiknek több milliárdszor akkora luminozitással kellett yilágítania, mint a mi Napunknak.

Lehet az, hogy mind a tizenkét objektum megtévesztő? Lehet, hogy mindegyikük viszonylag közeli nóva, amelyik történetesen a Virgo-halmaz egyik yagy másik galaxisának irányába esik? Egy ennyire vad egybeesés logikai és matematikai képtelenség lenne. A csillagászok kezdtek belenyugodni, hogy ezek a nóvák tényleg azokban a galaxisokban vannak, amelyek irányában látszanak, és hogy ezek szupernóvák.

A következő években Zwicky és mások további szupernóvákat

fedeztek föl. A mai napig mintegy 400 szupernóvát észleltek a különböző galaxisokban.

Ez a szám arra enged következtetni, hogy bármely adott galaxisban átlagosan ötvenévenként robban föl egy szupernóva. Más szóval minden 1250 közönséges nóra jut egy szupernóva.

A legfrissebb becslések szerint 300 millió parszekon belül körülbelül százmillió galaxis van. Ezek azok, amelyeket jelenlegi távcsöveinkkel észlelni lehet, ezért ezek azok, amelyekben észre tudjuk venni, ha egy szupernóva megjelenik. Ha átlagosan minden galaxisban minden ötven évben jelenik meg egy szupernóva, akkor a látható galaxisok valamelyikében tizenöt másodpercenként esik meg egy szupernóva-robbanás!

Sajnos, nem láthatjuk mindegyiket. Egy részüket saját galaxisuk óriási porfelhői takarják el, vagy elfödi a szupernóva és miközttünk halmozódó többi, keyésbé fényes csillag. Es persze nincs is annyi csillagász, hogy a százmillió látható galaxis mindegyikét állandóan szemmel lehetne tartani.

Mindazonáltal az elmúlt ötven év folyamán 400 szupernóvát észleltek más galaxisokban. Ez átlagosan hat és fél hetenként jelent egyet.

Egyszerűen hihetetlen, hogy a szupernóvák milyen elképesztően robbanékonyak. Ha Napunk képes volna arra, hogy szupernóvává váljék, akkor a Naprendszer yalamennyi bolygóját elpárologtatná, még mielőtt fényessége elérné a csúcsértékét.

Ha a mindössze 1,3 parszekre levő Alfa Centauri yálna szupernóvává, akkor a maximum idején nappali és éjszakai égboltunkon 15 500-szor fényesebben ragyogna a teleholdnál, vagy másképpen mondva, a Nap fényerejének egyharmad részével sütné.

Így hát teljesen érthető, hogy a csillagászok keyés dolgot szeretnének annyira minden részletében kikutatni, mint egy szupernóvát, és yalóban nagy csalódás, ha a megfigyelők arra yannak kárhoztatva, hogy 700 000 parszekre vagy még mes,zebb leyő galaxisokban keressék őket.

Azt persze józan ésszel senki sem kívánhatja, hogy a közvetlen közelünkben törjön ki egy szupernóva-robbanás; annyit azonban nyugodtan remélhetünk, hogy saját Tejútrendszerünkben készül föllángolni egy – nem 700 000 parszeknyi yagy annál is nagyobb távolságban, hanem mondjuk 700 parszeknyire.

Ha pedig egy-egy galaxisban mintegy ötyenévenként robban egy szupernóva, akkor bizonyosan kellett lenniük ilyeneknek a mi Tejútrendszerünkben is a múltban.

És voltak is! Mai ismereteink birtokában visszatekintve nyilvánaló, hogy az utóbbi ezer év folyamán legalább négy kétségbevonhatatlan szupernóva volt a Tejútrendszerben.

Az első az 1006-os nóva yolt a Farkas (latin nevén: Lupus) csillagképben, amelyik körülbelül tizedannyira volt fényes, mint a telehold; ez lehetett a legfényesebb nóva, amely az ember születése óta az égen

fölragyogott. Azután jött az 1054-es nóva a Bika csillagképben; majd a Tycho Brahe által tanulmányozott 1572-es nóva; végül pedig az, amelyet Kepler figyelt meg 1604-ben.

Csak négy? Ha ötvenévenkénti átlaggal számolunk, húsznak kellett volna lennie.

A nehézséget nyilván az jelenti, hogy nem az egész Galaktikát, hanem csak a hozzánk legközelebb eső töredékét látjuk. A számunkra belátható részben mindössze 250 évenként eggyel számolhatunk. Például adataink vannak arról – és erre később még visszatérünk –, hogy 1670-ben lehetett volna egy szupernóvát látni az égen, bár senki sem számolt be róla. Bizonyára porfelhők takarták el.

S van még valami, ami roppant sajnálatos. Ha csak négy Tejútrendszerbeli szupernóva volt látható egünkön az elmúlt ezer év folyamán, miért 1604-ben volt a negyedik, egyben az utolsó? A távcsövet öt évvel később találták föl!

1604 óta a legközelebbi szupernóva, az S Andromedae, 700 000 parszekre volt. Távcsövön nézték, lefényképezték, a színeképét viszont nem vizsgálták meg. És már egy évszázada nem akad egyetlen közelebbi sem.

Milyen kár!

Ami a törpéknél is kisebb

A RÁK-KÖD

Egy olyan óriási robbanásról, mint amilyen a szupernóvaké, nehéz elhinni, hogy semmi nyomot ne hagyja maga után. Egy csillagnak, amely rövid ideig egész galaxisnyi fényvel világít, bizonyosan kell valami hamut hátrahagynia — s tényleg így is van.

Attól fogva, hogy a szupernóvak létezésére fény derült — és ez csak az 1930-as években következett be —, alig várták, hogy kiderüljön, mi is ez a hamu. Lehet persze, hogy már azelőtt is észrevettük, anélkül, hogy tudtuk volna, mi is az.

Így például 1731-ben *John Bevis* (1693-1771) angol csillagász elsőként számolt be egy kicsiny, elmosódott foltról a Bika csillagképben.

Ez Messiernek, az üstökösadásznak is tudomására jutott, s tartva tőle, hogy elővigyázatlanul üstökösnek gondolhatják, fölvette azoknak az objektumoknak a listájára, amelyeket a többi üstökös-vadásznak figyelmen kívül kell hagynia. Egyenesen a katalógus élére állította, így ezt a Bika-beli elmosódott foltot olykor M 1-ként is emlegetik.

Az M 1-et először Lord Rosse vizsgálta meg alaposan 1844-ben ugyanazzal a nagy távcsővel, amellyel később számos távoli galaxis spirális jellegét is kimutatta. Számára az M 1 nem csupán egy pamatszerű folt volt. Távcsőve ennél sokkal világosabban mutatta; inkább egy örvénylő gáztömegre hasonlított, ami szinte kikényszerítette azt az értelmezést, hogy egy heves robbanás maradványairól van szó. A gázon belül számos foszlányszerű fényszál van, amelyek Rosse-t egy rák lábaira emlékeztették. Elnevezte hát az M 1-et Rák-ködnek, s ez a név mindmáig rajta is ragadt.

A Rák-köd nem kis érdeklődést keltett, mivel semmi sincs az égen, ami hasonlítana rá. Semmi más nem árulkodik ennyire nyilvánvalóan egy folyamatban levő robbanásról. Elkezdtek fényképezni, így természetesen lehetővé vált az évek során készített fényképek összehasonlítása is.

Ezt *John Charles Duncan* (1882-1967) amerikai csillagász végezte el először. 1921-ben a Rák-köd fényképét gondosan összevetette

azzal, amelyet 1909-ben a szintén amerikai *George Willis Ritchey* (1864-1945) készített ugyanazzal a távcsővel, amit most ő használt. Duncannak föltűnt, hogy az ő fotóján a Rák-köd valamelyest nagyobb, mint Ritchey-én: szemmel láthatólag tágult.

Ha ez igaz, akkor a köd talán egy nóva maradványa, méghozzá a por- és gázmennyiségből ítélve egy elég nagy nóváié. Duncan újabb, 1938-ban készített fényképével aztán a dolog félreérthetlenné vált.

Nem sokkal a tágulásról szóló első, 1921-es beszámoló után Hubble (ugyanaz, aki kevéssel utóbb csillagokra bontotta föl az Androméda-galaxist) részint ebből a tényből, részint abból, hogy a Rák-köd a Bika csillagkép azon helyének közelében van, ahol a kínaiak egy „vendégcsillagot” jegyeztek föl, arra következtetett, hogy ez a köd nem más, mint az 1054-ben feltűnt fényes nóva még mindig táguló maradványa.

Ez éppenséggel elképzelhető — de hogyan lehetne tényszerűen bebizonyítani?

Az észlelt tágulási sebességből visszszámolva meg lehet nézni, hogy mikor volt együtt az összes por és gáz egyetlen apró fénypontban. Ez elárulja, mennyi idő telt el azóta, hogy a Rák-köd helyén levő csillag fölrobbant. Mínd kiderült, a robbanás óta eltelt időtartam körülbelül 900 év.

Vagyis a robbanás számított időpontja majdnem pontosan 1054, a Bika-csillagképbeli fényes nóva megjelenésének dátuma. Azóta a csillagászok mind elfogadják, hogy a Rák-köd és az 1054. évi nóva egy és ugyanaz.

A Rák-köd látszólagos tágulási sebességéből a színek sötét vonalainak eltolódása alapján ki lehet számítani a valódi sebességét. Ez körülbelül 1300 kilométer/másodpercrek adódik. Könnyű kiszámítani, milyen távol kell lennie a Rák-ködnek ahhoz, hogy a valódi tágulási sebesség a fényképeken mért látszólagos sebességet eredményezze. Eszerint a Rák-köd mintegy 2000 parszekre van tőlünk.

Ismerve a távolságát, a Rák-köd látszólagos átmérőjéből azt is ki lehet számítani, hogy a por- és gázfelhő négy parszek átmérőjű, ami természetesen állandóan növekszik.

Az 1054. évi nóva fényességéről szóló beszámoló alapján és a tényleges távolság ismeretében pedig kiszámítható, hogy az abszolút fényrend meghatározásához használatos tízparszeknyi távolságból a nóva legnagyobb fényessége — 18-as magnitúdójú lehetett. Ezen a csúcsponton a csillagkitörés a Nap luminozitásának nagyjából 1,6 milliárdszorosával, vagyis az egész Tejútrendszer fényességének (ha azt képzeletben egyetlen pontba koncentrálnánk) hatvanad részével ragyogott. Az 1054-es nóva vitán felül szupernóva volt.

Mivel a Rák-köd 2000 parszekre van, egy porból és gázból álló valódi ködnek kell lennie. Nem lehet olyanfajta nagyon távoli csillaghalmaz, mint amilyenek az Androméda-köd bizonyult. Ha az lenne, akkor a színeke, akárcsak az Orion-kodé, különböző hullámhosszú, magukban álló fényes vonalakat tartalmazna. Csakhogy

nem ez a helyzet. A Rák-köd színeke folytonos, minden hullámhosszon

sugároz ki fényt, akár a csillagok. Sőt, a hőmérséklete jelentősen magasabb a csillagokénál, ugyanis a Rák-köd nagyon rövid, nagy energiájú hullámhosszakon sugároz, beleértve nemcsak az ibolyántúli fényt, hanem a kisebb hullámhosszú röntgensugarakat és a még rövidebb gamma sugarakat is. Bőségesen szolgáltat hosszúhullámú rádiósugárzást is, amely polarizált, csak egy irányban rezeg.

Hogy mi lehet egy ilyen folytonos és energiagazdag szinkép forrása, azt meglehetősen homály fedte egészen 1953-ig, amikor is Joszif Szamuilovics Sklovskij (1916–) szovjet csillagász azzal a föltételezéssel állt elő, hogy itt erős mágneses térben mozgó, nagy sebességű elektronokról van szó. Az efféle elektronmozgásnak éppen az észlelt típusú sugárzást kell eredményeznie. S ez nem pusztán elmélet volt. Pontosan ezt a jelenséget tapasztalták (természetesen sokkal-sokkal kisebb mértékben) a magfizikusok által konstruált részecskegyorsítókban, a szinkrotronokban. Ezekben elektromosan töltött részecskéket vezetnek keresztül mágneses téren, és úgynevezett szinkrotron-sugárzást kaptak.

Ezek szerint a Rák-köd rettentő erős szinkrotronsugárzást termel; de honnan származnak az elektronok? Honnan származik mindaz az energia, amely keresztülhajtja az elektronokat a mágneses téren, immár kilencszáz éve szakadatlanul, amióta a szupernóva fölrobbant?

1945-ben Baade (az, aki az Androméda-galaxis ma elfogadott távolságát kiszámította), Rudolph L. B. Minkowski (1895-1976) német-amerikai csillagásszal együtt kis változásokat figyelt meg a Rák-köd közepében levő két csillag környékén. Ragaszkodtak ahhoz, hogy a két csillag valamelyikének a szupernóva-robbanásán átment eredeti objektum maradványának kell lennie. Viszont ahhoz, hogy a szinkrotronsugárzás intenzitása ilyen nagy maradjon, a maradványcsillagnak 30 000-szer annyi energiát kellene kibocsátania, mint a Napnak. Hogy ez miképp lehetséges, az még egy negyedszázadig megoldatlan rejtély maradt.

Ha az 1054. évi szupernóva ilyen elképesztő maradványt hagyott maga után, akkor ezt a többiek is megtehették. Minden szinkrotron-sugárzást kibocsátó, táguló por- és gázfelhő szerfölött gyanús. A baj csak az, hogy minél régebben történt a szupernóva-robbanás, a táguló felhő annál nagyobb és ritkább, s annál kisebb a sugárzás erőssége.

A Rák-köd meglepő tulajdonságait valószínűleg azért észleljük, mert az 1054-es szupernóva viszonylag nem régi, meglehetősen közeli és jól látható, nem állnak az tban például porködök.

A rádióhullámok viszont a porfelhőkön is akadálytalanul át tudnak hatolni, a csillagászok pedig a második világháború után egyre nagyobb felbontóképességű műszereket és módszereket fejlesztettek

ki, hogy megkönnyítsék és egyre érzékenyebbé tegyék a rádióhullámok észlelését.

1941-ben Baade ködfoszlányokat talált a Kígyótartó csillagképben, körülbelül azon a helyen, ahol Kepler az 1604. évi szupernóvát látta. Ennek a szupernóva-maradványnak a kora nem magasabb a Rák-köd életkorának egyharmadánál, de sokkal messzebb, mintegy 11 000 parszekre van tőlünk, ezért észreyneni is jóval nehezebb. Baade-nak nem volt kidolgozott módszere, amivel megbizonyosodhatott volna róla, vajon ezek a por- és gázfoszlányok tényleg egy szupernóvából maradtak-e vissza. 1952-ben azonban a Cambridge-i Egyetem két csillagásza, *R. Hanbury Brown* és *Cyril Hazard* úgy találta, hogy erős rádióhullámú sugárzást bocsátanak ki. Ezzel elég nyilvánvaló lett a kapcsolat köztük és az 1604-es szupernóva között.

Ugyanabban az évben Brown és Hazard rádióhullámokat észlelt a Kassziópeia (latinosan: Cassiopeia) azon területéről is, amely Tycho Brahe nővájának felel meg. Utóbb Minkowski a kaliforniai Palomar-hegy ötméteres távcsövével a szupernóva-maradvány látható nyomait is megtalálta. Ez körülbelül 5000 parszekre van tőlünk. 1965-ben azután egy rádióhullám-forrást azonosítottak a Farkas csillagképben, föltehetőleg az 1006. évi nagy szupernóva maradványát, amely mindössze 1000 parszeknyire volt tőlünk.

Tehát az utóbbi évezred mind a négy ismert szupernóvája hagyott hátra nyomokat. Sőt, egy ötödik maradvány is létezik. 1948-ban két angol csillagász, *Martin Ryle* (1918-1984) és *F. Graham Smith* (1925–) erős rádióforrást észlelt a Kassziópeia csillagképben. Később Minkowski a hozzá tartozó (Cassiopeia A-nak elnevezett) ködfoltot is megtalálta. Ez nem ott volt, ahol Tycho Brahe szupernóvája, de tulajdonságai egy szupernóva-maradványról árulkodtak. Ha tényleg szupernóva okozta, akkor a robbanásnak 1677 körül kellett volna látszania a Földről, de a csillagközi felhők eltakarhatták, ugyanis senki sem számolt be róla.

Gyanús az úgynevezett Hattyú-köd is, amely – eltalálták! – a Hattyú csillagképben van. Ez egy ködfoltokból álló ív, amely egy 3° átmérőjű, azaz a teleholdnál hatszor nagyobb gyűrű részének tűnik. Ha ez is szupernóva-maradvány, akkor a robbanásnak mintegy 60 000 évvel ezelőtt kellett bekövetkeznie.

Van még egy figyelemre méltó alakzat, amely először 1939-ben vonta magára a csillagászok érdeklődését, amikor *Otto Struve* (1897-1963) orosz-amerikai csillagász halvány ködfoltot észlelt a déli féltekéről látható Vitorla (latin nevén: Vela) csillagképben. Az ausztrál *Colin S. Gum* (1924-1960) 1950-től 1952-ig figyelte, és eredményeit 1955-ben hozta nyilvánosságra.

• Erről az úgynevezett Gum-ködről kiderült, hogy a legnagyobb valamennyi ismert közül, az égboltnak talán tizenhatodrészt is elfoglalja. Annyira ritkás, hogy nem könnyű észrevenni, és mindenképpen túl messzire van déli irányban ahhoz, hogy akár Európából, akár Észak-Amerikából jól nyomon követhető legyen.

A Gum-köd nagyjából gömb alakú, és körülbelül 720 parszek átmérőjű. Közepontja mintegy 460 parszekre van a Naprendszerrel, így ez a legközelebbi ismert szupernóva-maradvány. Az innenső széle mindössze 100 parszek távolságban van, sőt a csillagászok egy időben még azt is elképzelhetőnek tartották, hogy a Naprendszer valójában ennek a ködnek a belsejébe esik.

Ezt egy 30 000 évvel ezelőtt fölrobbant szupernóva eredményezhette, amely rövid ideig olyan fényes lehetett, mint a telehold. Epp akkortájt született meg a mai ember. Érdekes lenne tudni, vajon elfogta-e őt és a neandervölgyi embert valamiféle rettegő bámulat, amikor ezt a második holdat észrevették az égen – föltéve, hogy bármelyikük eléggé délen tartózkodott ahhoz, hogy kényelmesen megszemlélhesse.

NEUTRONCSILLAGOK

Ha a szupernóva egy robbanó csillag látható fölvilágása, amely egy közönséges nóvánál sokkalta nagyobb energiájú, akkor – az 1920-as évek tudásszintje alapján – logikus volt arra következtetni, hogy az, ami e csillagok anyagából nem szóródik szét por- és gázfelhő formájában az űrben, fehér törpévé roppan össze.

A Rák-köd központi csillaga forró és kékes színű, s ilyen található a Gum-köd közepén is. Lehet, hogy minden szupernóva-maradvány centrumában egy-egy ilyen fehér törpe van, ezek azonban többnyire túl halványak ahhoz, hogy észrevegyük őket. A Rák-köd és a Gumkőd közepén levő kicsiny, forró csillagok nyilván csak azért láthatók, mivel véletlenül mind a két maradvány viszonylag közel esik hozzánk.

Először *Subrahmanyan Chandrasekhar* (1910–) indiai-amerikai csillagász munkái keltettek kételyt aziránt, hogy a csillagok összeroppanása mindig és mindenhol fehér törpéket eredményez.

Ő arra a következtetésre jutott, hogy amikor egy csillag összeroppan, a belőle létrejövő fehér törpének többé már nem lesz kapacitása a fúziós reakciók fönntartásához, a fúziós energia tehát nem jöhet szóba a méretcsökkenés megakadályozójaként.

A fehér törpék mégsem zsugorodnak a végletekig. Ha az atomok is szétterjednének és az anyag az atommagok érintkezéséig húzódná össze, egy akkora test, mint a Nap, egy mindössze tizennégy kilométer átmérőjű gömbbe tömörülne össze. A fehér törpék átmérője viszont akár tizenkétezer kilométer is lehet, a pici atommagok pedig még elég távol vannak egymástól ahhoz, hogy többé-kevésbé szabadon mozoghassanak. Olyan sűrűség mellett, mint amilyen a fehér törpéket jellemzi, az anyagnak bizonyos tekintetben úgy kell viselkednie, mint a gázoknak.

Chandrasekharnek sikerült kimutatni, hogy a fehér törpe kiterjedését az elektronjai tartják fenn, amelyek már nem az atomokban

foglalnak helyet, hanem véletlenszerűen mozognak, mint valami elektrongáz. Ezek az elektronok taszítják egymást, úgyhogy az elektrongázt még a fehér törpe erős gravitációs tere sem tudja bizonyos határon túl összehúzni.

Minél nagyobb a fehér törpe tömege, annál erősebb a gravitációs tere, és minél erősebb a gravitációs tér, annál inkább összesűrűsödik az elektrongáz. Következésképp minél nagyobb tömegű a fehér törpe, annál kisebb az átmérője.

Egy bizonyos ponttól az elektrongáz már nem képes ellenállni az összenyomásnak, és a fehér törpe összeroppan. 1931-ben Chandrasekhar kiszámította, hogy ez a Nap tömegének 1,44-szeresénél következik be. Ezt nevezzük „Chandrasekhar-határnak”.

És tényleg, az eddig megmért összes fehér törpének kivétel nélkül kisebb a tömege, mint 1,44 naptömeg.

Ez első ránézésre semmiféle problémát sem kellene hogy jelentsen a csillagászok számára. A csillagok több mint 95 százalékának a Chandrasekhar-határ alatt van a kezdeti tömege, és mondhatni nincs más választásuk, mint hogy fehér törpévé roppanjanak össze.

Nem látszik problémásnak a csillagok azon csekély kisebbsége sem, amelyek tömege e határ fölött van. Mielőtt összeroppanának, a csillagok hajlamosak arra, hogy robbanás útján ledobják külső rétegeiket, ezáltal tömegük egy részét elveszítik. Minél nagyobb tömegű a csillag, annál nagyobb erejű a robbanás és annál jelentősebb a tömegvesztés. A Rák-köd, amely az 1054-ben fölrobbant szupernóva által leadott anyagmennyiséget tartalmazza, háromszor akkora tömegű, mint a Nap.

Úgy lehetett tehát érvelni, hogy mielőtt összeroppanna, a nagytömegű csillagok mindegyike fölrobban, és tömegének oly nagy részét szórja szét, hogy az, ami a magból érintetlenül marad, minden esetben kisebb lesz 1,44 naptömegnél, s így már fehér törpévé roppanhat össze.

Chandrasekharnek mégis kétségei voltak. Mi a helyzet akkor, ha egy csillagnak olyan nagy a kezdeti tömege, hogy még az összes kiröpíthető anyagmennyiség eltávozása után is több marad vissza 1,44 naptömegnyinél? Ebben az esetben az összeroppanás nem eredményezhet fehér törpét – hanem akkor mit?

Próbáljuk meg kitalálni! Egy fehér törpe atommagokból és elektronokból áll. Az atommag protonokból és neutronokból épül föl. A neutronoknak nincsen elektromos töltésük, a protonok viszont pozitív elektromos töltéssel rendelkeznek, amely minden proton esetében pontosan ugyanakkora, és önkényesen egységnyiinek választható. Más szóval, minden protonnak a töltése + 1.

- Az elektronok mindegyikének szintén ugyanakkora elektromos töltése van, de ezek negatívak. Minden elektron pontosan a protonnal ellentétes töltéssel rendelkezik, úgyhogy a töltésük – 1.

A protonok és az elektronok, lévén ellentétes töltésűek, vonzzák egymást, de csak bizonyos határok között. Ha túl közel kerülnek

egymáshoz, már azt is figyelembe kell vennünk, hogy taszítás is létezik, és ez sokkal erősebb az ellentétes töltések közötti vonzásnál. Ez más jellegű és erősebb is, mint az elektronok kölcsönös taszítása, amely bizonyos határon túl megóvja a fehér törpét az összehúzódástól.

Viszont ha a gravitációs tér erőssége fokozódik, az elektronok egyre közelebb kényszerülnek egymáshoz és a protonokhoz, s egy ponton kénytelenek egyesülni a protonokkal. Ezáltal az ellentétes elektromos töltések semlegesítik egymást. Egy negatív elektron és egy pozitív proton helyett a kettő elektromos töltés nélküli kombinációját kapjuk, röviden: egy neutron.

Ha egy összeroppanó csillag tömege nagyobb a Chandrasekharhatárnál, akkor az összeroppanás során az elektronok és a protonok neutronokká egyesülnek, amelyek hozzáadódnak a már meglevő neutronokhoz. Az összeroppanó csillag kizárólag neutronokat tartalmaz, amelyek között, lévén semlegesek, semmiféle taszítás sem működik. Ekkor a csillag annyira összezugszorodik, hogy a neutronok egymáshoz érnek, és egy *neutroncsillagot* kapunk.

A neutroncsillag, ahogy már említettem, a Nap teljes tömegét egy tizennégy kilométernél nem nagyobb átmérőjű golyóba képes összezúfolni. Az ilyen csillag sokkal kisebb, mint egy fehér törpe, sokkal nagyobb a sűrűsége, és gravitációs tere is sokkal erősebb.

1943-ban Zwicky (az, aki a más galaxisbeli szupernóvákat vizsgálni kezdte) eltűnődött azon: hátha a neutroncsillagok is óriási robbanások végtermékei.

Úgy gondolta, hogy a szupernóva, amely milliószorosa nagyobb energiát termel, mint egy közönséges nóva, nyilván sokkal hatalmasabb robbanáson is megy keresztül. Ez az óriási robbanás katasztrofális összeroppanáshoz vezethet. Még akkor is, ha az összehúzódó maradvány nem olyan nagy tömegű, hogy lehetetlenné váljék egy fehér törpe létrejötte, az összehúzódás lehet annyira gyors, hogy a tehetetlenség következtében túljusson a fehér törpe állapoton és elhagyja azt. Ezért egy 1,44 naptömegnél kisebb csillag is végezheti neutroncsillagként.

Mindez nem sokkal azután történt, hogy *J. Robert Oppenheimer* (1904-1967) amerikai fizikus és tanítványa, *George Michael Volkoff* kidolgozta a neutroncsillagok és keletkezésük részletes matematikai modelljét. Tőlük függetlenül ugyanezt megtette *Lev Davidovics Landau* (1908-1968) szovjet fizikus is.

Így aztán az 1930-as években elég logikusnak tűnt az a gondolat, hogy a neutroncsillagok kialakulását szupernóva eredményezik, arra azonban nem volt mód, hogy ezt tényleges megfigyelésekkel ellenőrizzék. Még ha valóban léteznek is neutroncsillagok, kis méretük miatt bizonyosra vehetjük, hogy a viszonylag közeli is, bármilyen nagy távcsövön keresztül nézzük is őket, rendkívül halványaknak látszanának. Ha egyáltalán láthatók lennének, akkor sem tudnánk semmi egyebet megállapítani róluk, mint hogy nagyon-nagyon

halványak. A Rák-köd közepében lévő csillag is halvány, de hogyan dönthetnénk el, hogy neutroncsillag vagy inkább fehér törpe? Ha valami, hát éppen az a tény, hogy egyáltalán látható, amellel szól, hogy fehér törpe.

Valami halvány remény mégiscsak volt. A katasztrofális összesűrűsödésnek kétségkívül óriási hőmérséklet-emelkedéssel kell járnia, így egy neutroncsillag kialakulásakor a felszíni hőmérséklet nem lehet kisebb 10 000 000 °C-nál. Ilyen hőmérséklet esetén, még ha több ezer éves lehűléssel számolunk is, a csillag sugárzásának bőséges mennyiségű röntgensugarat kell tartalmaznia.

Következésképp, ha egy csillag kicsi és halvány, de röntgensugarakat kapunk az égboltnak arról a helyéről, akkor joggal gyanakodhatunk, hogy neutroncsillagról van szó.

Ez a halvány remény azonban egy szomorú ténnyel párosul. A röntgensugarak nem hatolnak át a légkörön: kölcsönhatásba lépnek a levegő atomjaival és molekuláival, így röntgensugár formájában nem jutnak el a Föld felszínére. Ezért aztán a neutroncsillagok hiába indítanak útnak erős jeleket, ez egyáltalán nem segít rajtunk — vagy legalábbis az 1930-as években így tűnt.

A RÖNTGENSUGARAK ÉS A RÁDIÓHULLÁMOK

Persze, ha a tudósok a Föld légkörén kívül is folytathatnának megfigyeléseket, minden másképp lenne.

A legkézenfekvőbb módon rakéták segítségével emelkedhetünk a légkör fölé. Ezt Newton már 1687-ben kimutatta. Csakhogy óriási különbség, hogy ezzel tisztában vagyunk, vagy hogy valóban képesek is vagyunk rakétákat alkalmazni.

Ennek is eljött az ideje. A második világháború idején a németek *Wernher von Braun* (1912-1977) munkásságának köszönhetően nagy ütemben fejlesztették a rakétameghajtású eszközöket. Céljuk az volt, hogy harci fegyverként használják föl őket, s ez sikerült is; ez azonban, a szövetséges hatalmak szerencséjére, a háborúnak már túl késői szakaszában következett be. A németeknek nem maradt idejük ahhoz, hogy kellő mennyiségben hadrendbe állítsák őket, és elejét vegyék a vereségnek.

A háború után aztán mind az Egyesült Államok, mind a Szovjetunió ott folytatta a rakétakutatást, ahol a németek abbahagyták. 1949-ben az Egyesült Államoknak sikerült olyan magasra küldeni föl rakétákat, hogy azok túllépjék a légkört, 1957-ben pedig a Szovjetunió valóban Föld körüli pályára juttatott rakétahajtómű segítségével egy mesterséges égitestet.

Most már lehetővé vált az űrből jövő röntgensugarak észlelése, és számos probléma egy csapásra megoldható lett.

Így például a Nap külső légkörének (az úgynevezett koronának) a szinképében olyan vonalakat találtak, amelyek semmilyen ismert

elemmel sem voltak azonosíthatók. Egyesek már arra gondoltak, hogy egy mindedig ismeretlen elem, a „koronium” van jelen a koronában.

Bengt Edlen (1906–) svéd fizikus viszont 1940-ben azt állította, hogy ezek a vonalak ismert elemek atomjaitól származnak, amelyeknek azonban elég szokatlan állapotban kell lenniük, hiszen a korona hőmérséklete 1 000 000 °C vagy még magasabb.

Hogyan lehetne eldönteni, létezik-e „koronium” vagy sem? Ha Edlennek van igaza, akkor a rendkívül forró koronának jelentős mennyiségű röntgensugárzást kell kibocsátania – csak hogy ezeknek a röntgensugaraknak az észlelésére, ha egyáltalán léteznek, 1940-ben nem volt mód.

Amint a rakéták hozzáférhetővé váltak, a helyzet megváltozott. 1958-ban *Herbert Friedman* (1916–) amerikai csillagász irányításával hat rakétát bocsátottak föl, amelyek a légkör fölé emelkedve alkalmasak voltak a Nap röntgensugárzásának kimutatására – már ha egyáltalán van ilyen. Nos, valóban észleltek röntgensugarakat; a korona valóban olyan forró, amilyennek Edlen föltételezte; a színekvonalak valóban közönséges, bár elég szokatlan körülmények között levő elemekből származnak – „koronium” tehát nem létezik.

A Nap azonban csak mérsékelten bocsát ki röntgensugárzást. Ezeket a sugarakat csupán azért tudtuk ilyen könnyen megtalálni, mert a Nap a közvetlen közelünkben van. Még a legközelebbi csillagok is, mint például az Alfa Centauri rendszer, 270 000-szer vannak tőlünk messzebb. Ha az Alfa Centauri valamelyik csillaga ugyanolyan intenzitással bocsát ki röntgensugarakat, mint a Nap, akkor

ebből mindössze $\frac{1}{70\,000\,000\,000}$ od akkora erősségű sugárzás ér el

hozzánk, mint a Napból, amit viszont nem tudnánk kimutatni. A még távolabbi csillagok röntgensugarai pedig még kevésbé észlelhetők.

Ezek szerint ha a világegyetem kizárólag Nap-szerű csillagokból áll, akkor nagyon valószínűtlen, hogy mai észlelőberendezéseinkkel magán a Napon kívül bármilyen más röntgensugár-forrást föl tudnánk fedezni az égen. Ha viszont vannak olyan furcsa csillagok, amelyek rendkívül erős röntgensugárzást szolgáltatnak (mint esetleg a neutroncsillagok), azokat képesek lennénk észlelni.

Ezért vált olyan fontossá, hogy megpróbáljuk meghatározni, milyen röntgensugár-források lehetnek az égen (ha egyáltalán vannak), hiszen ezek mindegyike azzal kecsgetett, hogy valami szokatlan dologról ad hírt.

1963-ban *Friedman* olyan röntgensugárzást észlelt az égen, amely nem a Napból származik, és az azóta eltelt években számos ilyen röntgenforrást találtak. 1969-ben például fölbocsátottak egy mesterséges holdat, amelyet kifejezetten a röntgenforrások észlelésére terveztek. A kilövés Kenya partjairól történt az ország függetlenségének ötödik évfordulóján, a neve pedig „Uhuru” volt (a „szabadság”

mutatott ki, felét kívül a Galaktikán.

Részben ez győzte meg az 1960-as évek csillagászeit arról, hogy a világegyetem sokkal forrongóbb hely, mint képzeltük. Az éjszakai égbolt látszólagos csöndje és nyugalma megtévesztőnek bizonyult. Az egyik égi röntgenforrás a Rák-köd volt.

Ez nem érte meglepetésként a csillagászokat. Ha nekik kellett volna kiválasztani egy foltot az égen, amelyből észlelhető röntgensugárzás eredhet, akkor biztosan mindegyikük a Rák-ködre szavazott volna. Először is ez biztosan szupernóva-robbanásból maradt vissza, a legkatasztrofálisabb eseményből, ami csak egy csillaggal megtörténhet. Azonkívül ez a robbanás nem túl messze és nem túl régen játszódott le. Mi több, a ködben tapasztalt óriási örvények és a gyors tágulás alapján minden remény megvolt arra, hogy hőmérséklete elég magas a röntgensugárzás keltéséhez.

A röntgensugárzásnak igazából két forrása képzelhető el. Az egyik a tulajdonképpen ködöt alkotó gáz és por gyorsan táguló térfogata. A másik a középen levő kis, forró csillag, az a maradvány, amely esetleg neutroncsillag is lehet.

Égi mozgása során a Hold 1964-ben véletlenül a Rák-köd előtt készült keresztülhaladni. Fokról fokra nyomult a ködfolt elé. Ha a röntgensugárzást magának a ködnek a forró, örvénylő gázai keltik, akkor a sugárzás erősségének fokozatosan kell megszűnnie, ahogy a Hold elfedi a ködöt. Ha viszont a röntgensugárzás főleg a középpontban lévő, föltételezett neutroncsillagtól származik, akkor a mért intenzitás előbb csökkenni kezd, ahogy a Hold a köd elé ér, azután hirtelen leesik, amikor a piciny csillagot is eléri, majd tovább folytatódik a lassú csökkenés, ahogy a köd többi része is a Hold mögé kerül.

Amikor elérkezett a fogyatkozás ideje, egy röntgenérzékelő rakétát bocsátottak föl, és a megfigyelések eredményeiből úgy tűnt, hogy a sugárzás szabályosan csökken. Hirtelen visszaesésnek nyoma sem volt. A neutroncsillag észlelésével kapcsolatos remények meghiúsultak.

Mégsem foszlottak szét egészen. A pusztán tény, hogy a központi csillag és a környező gázok egyaránt lehetnek röntgensugár-források, azzal a veszéllyel jár, hogy esetleg összekeverjük őket. A rejtvényt csak akkor fejthetjük meg, ha sikerül valami olyat találnunk, ami kizárólag magát a csillagot jellemzi, a környező gázokat viszont nem.

De mi lehet ez a valami? Erre teljesen váratlanul jött meg a válasz. A röntgensugarak és a gammasugarak az elektromágneses színekép nagyenergiájú végén találhatóak. A másik, alacsony energiájú végén helyezkednek el a rádióhullámok.

Ez utóbbiak általában éppúgy nem hatolnak át a légkörön, mint a röntgensugarak. Ennek oka a légkör egyik felső, elektromos töltésekben gazdag rétege, az ionoszféra. Az ionoszférának megvan az a

tulajdonsága, hogy a rádióhullámokat visszaveri, a földi eredetű, fölfelé haladó hullámokat pedig visszairányítja a földre. Ha az égitestekről érkeznének is rádióhullámok, azokat ugyanúgy visszaverné az űrbe, tehát sohasem jutnának el a Föld felszínére.

Ez azonban nem érvényes a legrövidebb rádióhullámok egy sávjára, a mikrohullámokra. Ezek hossza a rádióhullámokéhoz képest nagyon rövid (a „mikro” a görög „rövid” szóból származik), de azért jóval hosszabb, mint a közönséges fényhullámoké vagy akár az infravörös sugárzásé.

Ezek szerint az elektromágneses szinképben két olyan sáv van, ahol a sugárzás kevés veszteséggel tud áthatolni a földi légkörön. Az egyik a látható fény tartománya, a másik pedig a mikrohullámú tartomány, s a kettő közül ez utóbbi a szélesebb.

A „fényablakot” azóta ismerjük, amióta létezőnk, hiszen szemünk van, amely képes érzékelni a fényt: láthatjuk a Napot, a Holdat, a bolygókat, a csillagokat. A „mikrohullámú ablak” észlelésére viszont semmilyen természetes érzékszervünk sincs, sőt erről egyáltalán csak az utóbbi fél évszázadban szereztünk tudomást.

A mikrohullámú ablakot véletlenül fedezte föl *Karl Guthe Jansky* (1905-1950) amerikai rádiómérnök 1931-ben. A Bell Telephonnál dolgozva megpróbálta kideríteni, pontosan miből erednek a rádióvételt meghíúsító légköri zavarok. Veyőkészüléke eközben egy, az égből jövő sípolást rögzített. Eleinte úgy tűnt, hogy a Napból származó mikrohullámok okozzák, de a forrása idővel egyre távolabb került a Naptól, és 1932-ben Jansky megállapította, hogy a Nyilas (latin nevén: Sagittarius) csillagképben van. Ma már tudjuk, hogy a Galaktika központjából ered.

Jansky fölfedezését a hivatásos csillagászok nem aknázták ki azonnal, mivel a mikrohullámú észlelés technikája még nem volt eléggé fejlett. Viszont egy amatőr rádiórajongó, *Grote Reber* (1911—), tudomást szerezve Jansky közleményéről, 1937-ben kiváló paraboloid detektort épített otthon, a hátsóudvarban. Ez lett az első *rádiótávcső*, és Reber az eget pásztázta vele, hogy rádióforrásokat leljen. Így készült el az ég első rádiótérképe.

Ez idő tájt vett részt (másokkal együtt) *Robert Watson-Watt* (1892-1973) skót fizikus egy olyan eljárás tökéletesítésében, amely más módon nem látható tárgyak irányát és távolságát képes letapogatni mikrohullámú sugárnyaláb segítségével. A mikrohullámok visszaverődnek a tárgyról, ezek a visszaverődött hullámok pedig fölfoghatók. Az az irány, amelyből a hullámok visszaérkeznek, megadja a tárgy irányát, a sugár kibocsátása és a visszaverődött hullámok észlelése közötti időközökből pedig kiszámíthatjuk a távolságát. Ez az úgynevezett radartechnika.

A radar döntő fontosságúnak bizonyult a második világháborúban, s a háború végére kidolgozták a mikrohullámok kibocsátására és vételére alkalmas technikát. Így tehát a háború után a csillagászok részletekbe menően meg tudták vizsgálni, ki tudták elemezni a távoli

76csillaghalmazok által kibocsátott mikrohullámokat. Egyre jobb rádiótávcsöveket építettek, aminek sok nagyfontosságú, legnagyobbbrészt váratlan fölfedezés lett az eredménye. Valóságos csillagászati forradalom ment végbe, nem kisebb jelentőségű, mint az, amelyet három és fél évszázaddal korábban a távcső föltalálása idézett elő.

PULZÁROK

1964-ben a rádiócsillagászok rájöttek, hogy a rádióforrások sugárzása sem minden esetben egyenletes, mint ahogy a fényforrásoké sem föltétlenül az.

A fényhullámokat a légkör a hőmérséklettől függően különböző mértékben törli meg. Az atmoszféra eltérő hőmérsékletű légtömegeket tartalmaz, s a hőmérséklet időben is változik, ezért a csillagok gyöngye fénye megtörik, és így, mivel az irány időben kismértékben változik, a csillag „pislogni” látszik. A rádióhullámokat a légkör töltött részecskéi hajlítják el ugyanilyen véletlenszerű módon, így a rádióforrások is „pislognak”.

Ennek a gyors pislogásnak vagy *szcintillációnak* a vizsgálatához különlegesen tervezett rádiótávcsövek szükségeltetnek, s *Antony Hewish* (1924—) angol csillagász ki is eszelt egy ilyet. Ez 2048 különálló vevőkészülékből áll, amelyeket 18 000 négyzetméternyi területen szétszórva helyeztek el.

Az újfajta rádiótávcső 1967 júliusában kezdte az eget pásztázni pislogó rádióforrások után kutatva. A vezérlőszerkezetet Hewish egyik tanítványa, *Susan Jocelyn Bell* (1943—) angol rádiócsillagász kezelte.

Augusztusban Bell valami furcsát tapasztalt. Éjfélkor, amikor a szcintilláció általában kismértékű szokott lenni, jelentős szcintillációt kapott egy, a Véga és az Altair nevű csillagok között levő forrásból. Mi több, ez a szcintilláció hol megjelent, hol eltűnt. Fölhívta rá Hewish figyelmét, s novemberre kiderült, hogy érdemes is volt odafigyelni rá.

A rádiótávcső rögzítőberendezése nagysebességű fölvételre volt állítva, és kiderült, hogy a szcintillációhoz időről időre egy lökészerű sugárzás járul, amely nagyon rövid, mindössze a másodperc ^huszadrészéig tart. Ezért jelent meg és tűnt el a szcintilláció. Ha nem kifejezetten magára az illető forrásra irányították, akkor pásztázás közben a műszer néha véletlenül épp a lökészerű sugárzás idején csípte el, de ez többnyire két lökés között következett be.

Folytatva a lökések tanulmányozását, azt találták, hogy azok rövid és szabályos, méghozzá rendkívül szabályos időközökben jönnek. A lökések közötti időtartam körülbelül 14- (nyolc tizedesjegy ^pontossággal megadva: 1,337 301 09) másodperc.

Soha egyetlen égi jelenséget sem figyeltek még meg, ami ennyire szabályos, ugyanakkor ennyire rövid periódusidejű lett volna. Akár-

mi legyen is az oka, az mindenképpen példátlan. Valamilyen ciklikus dolognak kell lennie – valami olyan csillagászati objektumnak, amely vagy egy másik körül kering, vagy a tengelye körül forog, vagy lüktet, és valamilyen okból minden keringése vagy forgása vagy lüktetése egy mikrohullámú lökést eredményez.

Első ránézésre a lüktetés tűnt a legjobb tippnek, Hewish ezért „pulzáló csillagnak” keresztelte el (a latin „lüktető” szóból), de ezt az elnevezést hamarosan a rövidebb *pulzár* alakban kezdték használni.

Miután Hewish tisztázta, hogy a pulzár miképpen bocsát ki mikrohullámokat, az efféle objektumok észlelése is könnyebb lett. Minden egyes lüktetés egy elég erős mikrohullámú lökést kelt. A baj csak az, hogy a közönséges rádiótávcsövekkel nem lehet fogni az egyes lökéseket, csak az egységnyi idő alatt kisugárzott átlagos kibocsátást. Ha a lökéseket a köztük lévő nyugalmi szakaszokkal együtt kiátlagoljuk, akkor a mikrohullámú sugárzás intenzitása mindössze huszonhét részre a lökés csúcspontjához, ez az átlag pedig nem elég magas ahhoz, hogy különösebben észrevehető legyen.

Az új rádiótávcső észlelni tudta az egyes lökéseket is, és Hewish elkezdte átfésülni az eget, további hasonlókat keresve. 1968 februárjára még három pulzárt sikerült találnia, így már kellően alátámasztottnak érezte felfedezését ahhoz, hogy nyilvánosságra hozza.

Azonnal bekapcsolódtak mások is a kutatásba, és rövid idő alatt találtak további öt pulzárt. Az 1980-as évek elejéig közel négyszáz pulzárt azonosítottak.

1968 októberében olyan helyen bukkant föl egy, ahol már bármi szabálytalannak a létezése elképzelhető volt – a Rák-ködben. Ez sokkal gyorsabban lüktetett, mint az első pulzár. Periódusideje mindössze 0,033 099 másodperc, ami azt jelenti, hogy másodpercenként körülbelül harminc mikrohullámú lökés lép föl. Később a Gum-köd közepén is felfedeztek egyet.

Itt már nem állt fönn az összetévesztés veszélye. Ha egyszerűen egy folyamatosan kibocsátott sugárzásról volna szó, legyen az röntgensugár vagy rádióhullám, akkor nehezen lehetne különválasztani a sugárzásnak azt a részét, amelyik a központi csillagból ered, illetve azt, amelyik a ködfoltból jön. A nagyon gyors és szabályos lüktetés azonban pontosan lokalizálható, mert az illető mindig egyetlen pont, nem pedig egy kiterjedt folt bocsátja ki. Ez a pont pedig a Rák-ködben is, a Gum-ködben is a központi csillaggal azonos.

Terjedni kezdett a fölismerés: ahogy egy planetáris ködnek egy fehér törpe a központi csillaga, ugyanúgy egy szupernóva-maradvány központi csillaga egy pulzár. Más szóval: a szupernóvaként fölrobbant csillagok pulzárakká roppannak össze.

De mi az a pulzár?

A mikrohullámú lüktetés rövid periódusideje arra enged következtetni, hogy a pulzárnak néhány másodperc, olykor egy töredék másodperc alatt kell egyetlen lüktetnie, keringenie vagy körbefordulnia. Az objektumok egyetlen fajtája sem képes semmiféle ciklikus változásra ilyen óriási sebességgel, hacsak nem nagyon kicsi és nem rendelkezik roppant erős gravitációs térrel, amely az ilyen

gyors

körforgás esetében föllépő tehetetlenségi erők ellenében megóvja őt a széttöredezéstől.

- Ismerünk olyan objektumokat, amelyeknek kicsik a méretei és erős gravitációs terük is van. Ilyenek a fehér törpék – de ehhez még egy fehér törpe is túl nagy, és a gravitációs tere sem elég erős. Úgy tűnt, nem marad más hátra, mint föltételezni: a pulzár egy neutroncsillag. Végtére is az elég kicsi, és elég erős gravitációs térrel is rendelkezik.

Nem valószínű azonban, hogy egy neutroncsillag a maga elképzelhetetlenül erős gravitációs terével képes lenne lüktetni. Az ilyen nem is kerülhet körbe a másodperc törtrésze alatt egy másik objektumot, még egy másik neutroncsillagot sem. Kizárásos alapon egyedül a forgó neutroncsillag marad. Elméletileg egy neutroncsillag nemcsak harmincszor fordulhat körbe másodpercenként (ahogy a Rák-köd pulzárjának kellene), hanem akár ezerszer vagy még többször is. 1982 novemberében találtak egyet, amely másodpercenként 640 mikrohullámú lökést bocsát ki – ezek szerint ez egy olyan neutroncsillag lehet, amely ezredmásodpercnél alig valamivel hosszabb idő alatt fordul meg a tengelye körül. Ezt „millimásodperces pulzárnak” híjják.

De miért kell egy forgó neutroncsillagnak mikrohullámú lökéseket kibocsátania?

Számos csillagász foglalkozott ezzel a kérdéssel, köztük az osztrák származású *Thomas Gold* (1920–). Azzal érveltek, hogy egy ilyen rendkívüli mértékben összesűrűsödött csillag irtózatosan erős mágneses térrel kell hogy rendelkezzen, a mágneses erővonalak pedig körbe-körbe tekerednek a gyorsan forgó neutroncsillag körül.

Vegyük számításba, hogy a neutroncsillagnak különlegesen magas a hőmérséklete! Várható, hogy gyors elektronokat termel – ezek az egyedüli objektumok, amelyek elég gyorsan mozognak ahhoz, hogy az erős gravitációs vonzás ellenére képesek legyenek megszökni a felszínéről. Mivel az elektronok elektromos töltéssel rendelkeznek, a mágneses erővonalak mentén kell haladniuk, és csak a neutroncsillag mágneses pólusainál szökhetnek meg. Ezeknek a mágneses pólusoknak a csillag ellentétes oldalain, bár nem feltétlenül a forgási

pólusoknál kell lenniük. Példának okáért a Föld mágneses pólusai is eléggé távol esnek a forgási pólusoktól.

A neutroncsillagtól távolodva az elektronok erősen görbülő pályán haladnak, amelyet a mágneses erővonalak kényszerítenek rájuk, és sugárzás (többek között mikrohullámú sugárzás) formájában adják le energiájukat. A neutroncsillag forgása során egyik vagy néha mindkét mágneses pólusa a Föld irányába eshet, és valahányszor ez történik, mikrohullámú sugárzást észlelünk. Ezért „pulzál”

a forgó neutroncsillag. Minél gyorsabb a forgás, annál gyorsabb ütemű lesz a lüktetés.

Minthogy az a sugárzás, amely a szökésben levő elektronok energiavesztesége árán termelődik, a teljes elektromágneses szinképet átfogja, ezért nemcsak mikrohullámú, hanem ugyanúgy fénylüktetést is kellene tapasztalnunk.

A Rák-köd közepében levő látható pulzár fénye mégis állandó. De mivel ennek másodpercenként harmincszor kell fölvilanni, várható is, hogy állandónak tűnik éppúgy, ahogy a moziban is folytonosnak látjuk a mozgást, holott igazából állóképek egymásutánját vetítik a vászonra, másodpercenként tizenhatot.

1969 januárjában, három hónappal azután, hogy a Rák-ködbeli pulzárt először észlelték, *stroboszkóppal* is megvizsgálták a fényét, azaz a fénynyalábot egy résen vezették keresztül, amelyet csak a másodperc harmincadréséig tartottak körülbelül nyitva. Ezzel a módszerrel nagyon rövid időközönként lehetett lefényképezni a csillagot, és úgy találták, hogy egyes rövid időtartamokban látszik, másokban pedig nem. Másodpercenként harmincszor fölvilágít és kialszik. Ez tehát egy „optikai pulzár”.

Továbbmenve Gold kimutatta, hogy ha a pulzár valóban egy forgó neutroncsillag, akkor állandóan veszít energiájából, a forgási sebességének pedig lassan csökkennie kell. A sugárzás lüktetései fokozatosan növekvő időközönként kell hogy köyössék egymást. A változás roppant kicsiny, de a lüktetés annyira szabályos, hogy még ennek is mérhetőnek kell lennie.

Ezért a Rák-ködbeli pulzár, amikor 900 évvel ezelőtt egy szupernóva fölrobbanása révén létrejött, másodpercenként ezerszer fordulhatott meg a tengelye körül. Energiájából gyorsan veszített: az első 900 évben több mint 97 százalékát le kellett adnia, mivel most már csak harmincszor fordul körbe másodpercenként. A forgás még most is lassul – bár természetesen egyre csökkenő ütemben.

Gold feltevését ellenőrzendő gondosan megvizsgálták a Rák-ködbeli pulzár periódusát, és valóban azt találták, hogy a forgása lassul. A lüktetések közötti idő naponta 36,48 milliárdod másodperccel nő; ebben az ütemben ez az időköz 1200 év alatt duplázódik meg.

Ugyanezt a jelenséget más pulzároknál is fölfedezték, amelyek periódusideje hosszabb, mint a Rák-ködbelié, ezért lassulásuk is kisebb mértékű. Az elsőként fölfedezett pulzár, amelynek periódusideje a Rák-ködbeliének negyvenszerese, olyan ütemben lassul, hogy a periódusidő tizenhat millió év alatt duplázódik meg.

Ahogy egy pulzár forgása lassul és lüktetési periódusa hosszabb lesz, a lüktetések egyre kisebb energiájúakká válnak. Mire a periódusidő eléri a négy másodperces hosszúságot, az egyes lüktetések már nem elég erősek ahhoz, hogy fölismerhetők legyenek a világegyetem egyenletes háttérben. A pulzárak úgy három-négy millió évig maradnak észlelhetők.

Egyetlenegy adat viszont sehogyan sem akar beleilleni az imént fölrajzolt elegáns sémába. Az a nemrég fölfedezett millimásodperces pulzár, amelyről korábban említést tettem, valamivel több mint egy ezredmásodperc alatt fordul körbe, ezért nagyon fiatalnak kellene lennie. Más tulajdonságai viszont arra utalnak, hogy valójában egy nagyon öreg pulzárral van dolgunk. Mi több, a periódusideje nem hosszabbodik észrevehetően.

Hogyan lehetséges ez? Mi tartja fenn ezt a gyors forgást? A ma legésszerűbbnek tűnő föltételezés szerint az ilyen pulzárak tömeget nyernek egy közeli társcsillagtól, úgyhogy a forgásuk gyorsul.

Különféle robbanások

AZ I-ES ÉS A II-ES TÍPUS

Örvendetes dolog, sőt egyenesen bámulatos, hogy tizenöt év alatt közel négyszáz csillagot tudtunk találni egy olyan fajtából, amely egy 1969-ben történt véletlen fölfedezésig teljességgel ismeretlen volt. Más szempontból viszont azt kérdezhetjük: hogyhogy csak ilyen keveset?

Tegyük fel, hogy a szupernóvák maradványai szükségképpen neutroncsillagok, és hogy Tejútrendszerünkben ötvenévenként robban föl egy-egy szupernóva! Ha továbbá azt is föltételezzük, hogy Galaktikánk tizennégy milliárd éves, és hogy a szupernóva-robbanás gyakorisága ezalatt nem változott, akkor összesen 280 millió ilyen robbanásnak kellett bekövetkeznie. Nem arra kellene ezek szerint számítanunk, hogy ugyanennyi neutroncsillagot fogunk találni, tehát a Galaktika minden 900 csillaga közül egyet? Miért van akkor mindössze négyszáz?

De gondoljunk csak bele: teljesen mindegy, hány milliárd éves a Tejútrendszer, ha a neutroncsillagok nagyjából négymillió évig maradnak csak észlelhetők. Ebben az esetben a létező neutroncsillagok óriási többsége túl öreg ahhoz, hogy észreveggyük őket, s egyedül az utóbbi négymillió évben keletkezettek bírnak olyan erős lüktető sugárzást kibocsátani, amelyet műszereink észlelni képesek.

Ha az utóbbi négymillió évre szorítkozunk, akkor mindössze 80 000 szupernóvával, következésképp legföljebb 80 000, elvileg észlelhető neutroncsillaggal számolhatunk a Tejútrendszerben.

Persze, ennek a 80 000 szupernóvának is csak egy töredékét láthatjuk a Földről, nagyobb részüket a csillagközi porfelhők rejtik. De csak a fényüket rejthetik el. A rádióhullámok könnyedén áthatolnak a porfelhőkön, így a pulzárak által kibocsátott mikrohullámú sugárzást rádiótávcsöveink még akkor is rögzíthetik, ha az eredeti szupernóva rejtve marad optikai távcsöveink előtt.

De ki állította, hogy a mikrohullám-nyaláb épp mifelénk fog irányulni? Könnyen lehet, hogy forgása során a neutroncsillag a mikrohullámú és egyéb sugárzást egy olyan kör mentén bocsátja ki, amelynek egyetlen pontja sem esik a Föld irányába. Egy ilyen neutroncsillagot, legyen bármilyen erős is a sugárzása, semmilyen mai technikával sem leszünk képesek kimutatni.

Ha a négymillió évnél fiatalabb neutroncsillagok közül azokat vesszük, amelyek történetesen mifelénk sugároznak, akkor ezek száma 1000 alatt marad (jóllehet az optimistább csillagászok sokkal többnek becsülik ezt az értéket).

Azt is figyelembe kell vennünk, hogy nem minden szupernóva eredményez szükségképpen neutroncsillagot, emiatt az észlelhető neutroncsillagok száma még kisebb lesz. Sőt, úgy tűnik (bár lehet, hogy ez indokolatlan pesszimizmus): máris közel járunk ahhoz a határhoz, amennyi neutroncsillagot egyáltalán fölfedezhetünk.

Galaktikánk szupernóvájának kutatása során, amit az 1930-as években Zwicky indított el, a csillagászok megtanultak fénygörbéjük és más tulajdonságaik alapján különbséget tenni közöttük. Ma általánosan elfogadott, hogy kétfajta szupernóva van, s ezeket I-es és II-es típusúaknak szokták nevezni.

Az I-es típusúak fényesebbek, abszolút fényrendjük eléri a — 18,6 magnitúdót, a Nap fényerejének 2,5 milliárdszorosát. Ha egy ilyen szupernóva az Alfa Centauri távolságában lenne, akkor fényességének csúcértéke a Nap fényességének egyhetede volna. A II-es típusú szupernóvák valamivel halványabbak, körülbelül egymilliárdszor fényesebben világítanak a Napnál.

Egy további különbség abban áll, hogy az I-es típusú szupernóvák fényessége a csúcsponton túljutva nagyon szabályosan csökken, míg a II-es típusúaknál ez sokkal szabálytalanabb.

A harmadik eltérést akkor találjuk meg, ha a fény színképét vizsgáljuk. Az I-es típusú szupernóvákban szinte teljesen hiányzik a hidrogén, a II-es típusúak viszont hidrogénben gazdagok.

A negyedik különbség az elhelyezkedésben mutatkozik. A II-es típusú szupernóvák majd mindig spirális galaxisokban, közelebről ezek karjaiban találhatóak. Az I-es típusúak viszont a karoknál jobban kedvelik a spirálgalaxisok magját, valamint az elliptikus galaxisokat.

Az elhelyezkedésbeli különbség yalami fontosról árulkodik. Az elliptikus galaxisokban többnyire nincs por. Csillagaik általában viszonylag kicsik, legföljebb alig valamivel nagyobbak a Napnál, és egyidősek vagy legalábbis majdnem egyidősek a Galaktikával. Ugyanez érvényes a spirálgalaxisok magjára is.

A spirálkarok viszont tele vannak porral, és (mint később látni fogjuk) sok fiatal és nagy tömegű csillagnak nyújtanak otthont.

I-es típusú szupernóvához tehát olyan csillag kell, amelynek a tömege körülbelül egyenlő a Napéval vagy annál kicsit nagyobb. • A II-es típusú szupernóva létrejötte viszont olyan csillagot föltételez, amelynek a tömege lényegesen nagyobb, mint a Napé — legalább háromszor, bizonyos esetekben talán még többször akkora.

Minél nagyobb a csillag tömege, annál ritkábban fordul elő. Az I-es típusú szupernóvához szükséges viszonylag kis csillagok leg-

alább tízszer olyan gyakoriak, mint a II-es típusúnak megfelelő nagy tömegűek. Ebből az következne, hogy az I-es típus legalább tízszer olyan gyakori, mint a II-es.

Csak hogy nem ez a helyzet: mindkettőjüknek egyforma a gyakorisága. Ebből arra következtethetünk, hogy nem minden kis csillag végzi I-es típusú szupernóvaként, hanem csak egy csekély kisebbségüknek lesz valóban ez a sorsa. Ahhoz, hogy valami I-es típusú szupernóvává váljon, sokkal szigorúbb feltételeknek kell eleget tennie, mint gondolnánk. Nem elég, ha a csillag hozzávetőleg Napméretű, ráadásul még különleges fajtájúnak is kell lennie.

Ez viszont már átvezet a két szupernóva-típus közötti kémiai különbségekhez. Az I-es típusú szupernóvákban nem találunk hidrogént, ezek tehát fejlődésük vége felé járnak. Ha egy csillagban nincs hidrogén, viszont szénben, oxigénben és neonban gazdag, akkor biztosak lehetünk benne, hogy ez egy fehér törpe. Oda lyukadunk ki tehát, hogy az I-es típusú szupernóvák nem lehetnek mások, mint robbanó fehér törpék.

Egy magára hagyott fehér törpe egészen stabilis, nem robban föl. Csak hogy a fehér törpék, mint már tudjuk, nem mindig vannak magukra hagyatva. Némelyik közülük egy szoros kettőscsillag-rendszer tagja. Ha egy fehér törpe társacsillaga önnön fejlődése során vörös óriássá puffad fel, anyaga egy akkréciós korongba áramlik át, amely időről időre tömeget ad át a fehér törpének.

Korábban láttuk, hogy ez a fehér törpének periodikusan átadott anyag addig melegszik és sűrűsödik, míg egyszer csak beindul a fúzió. Az akkréciós korong maradékát óriási robbanás veti szét, a fehér törpe fényessége egy időre megsokszorozódik, és ez az, ami a Földről nóvának látszik. Ez azután hosszabb-rövidebb időközönként megismétlődik.

Valahányszor nóvává alakul, a fehér törpe magánál tartja az akkréciós korong tömegének egy részét, így az össztömege fokozatosan megnövekszik.

De mi a helyzet akkor, ha a fehér törpe nagyon nagy tömegű, mondjuk 1,3-szer akkora, mint a Nap? Vagy mi történik, ha a társacsillagnak van szokatlanul nagy tömege, és rendkívüli méretű vörös óriássá tágul, úgyhogy anyaga sokkal gyorsabban áramlik át a fehér törpe vonzáskörébe? Vagy ha egyenesen mindkettő fennáll?

Ilyenkor a fehér törpe akkora tömeget nyerhet, méghozzá elég gyorsan, amely átlendíti az 1,44 naptömegnek megfelelő Chandrasekhar-határon. Amint ez bekövetkezik, a fehér törpe nem tudja tovább fönntartani önmagát, hanem összeroppan, Rohamosan sűrűsödik, és hatalmas erővel vágja egymáshoz a szén- és oxigén-atommagokat. Az egész azonnal fuzionálni kezd, olyan nagy mennyiségben és annyira gyorsan termelve energiát, hogy az eredmény egy gigantikus robbanás lesz. Ez pár hét leforgása alatt annyi energiát sugároz ki, mint a Nap egész, sokmilliárd éves élete során. Röviden,

a fehér törpe összeroppanása és anyagának fúziója nem egyszerűen nóvát, hanem I-es típusú szupernóvát eredményez.

Az effajta robbanás valósággal szétveti a csillagot. Nem valamiféle összeroppanó csillag (fehér törpe vagy neutroncsillag) marad tehát utána, hanem mindössze egy örvénylő, táguló por- és gázfelhő. Tycho Brahe 1572. évi és Kepler 1604. évi nóvája minden valószínűség szerint I-es típusú szupernóva volt, s egyiknek a helyén sem találtak neutroncsillagot, csupán ködfoltokat.

A II-es típus is a csillagfejlődés vége felé helyezkedik el, de nem annyira a legvégén, mint az I-es típus. A II-es típusú robbanás olyan csillagokban lép föl, amelyek elérték a vörös óriás állapotot. Ez viszont nagy tömegű csillagokkal szokott megesni, olyanokkal, amelyek a Napnál legalább háromszor-négyszer nagyobb tömegűek, s minél nagyobb tömegű a csillag, annál nagyobb méretű lesz a vörös óriás.

Egy igazán nagy vörös óriás különböző rétegekből áll, akár a hagyma. A legkülső rétege még hidrogén és hélium, az a keverék, amelyből a szokásos fősorozatbeli csillagok fölépülnek. Ez alatt egy nehezebb atommagokat (szén, nitrogént, oxigént és neont) tartalmazó héj van. Ezt követi a harmadik, amely nátriumban, alumíniumban és magnéziumban gazdag. Az ez alatti, negyedik héjban sok a kén, a klór, az argon és a kálium. Az ötödik, középponti héj főleg vas-, kobalt- és nikkel-atommagokból áll.

A legkülsőt leszámítva, valamennyi héj a kívülből levőkben még meglévő kisebb atommagok fúziójának termékeiből áll. Ha a csillag kialakított egy vasból, kobaltból és nikkelből álló központi magot, akkor a folyamat már nem tud továbbmenni. Ezeknek az atomoknak bármilyen további átalakulása (akár összetettebb atomokká való egyesülésük, akár kisebb atommagokra hasadásuk) nem energiafölszabadulással, hanem energiaelnyeléssel járna.

A vasmag növekedtével a csillag elér egy olyan állapotba, ahol már nem képes elegendő energiát termelni ahhoz, hogy kiterjedését megőrizze. A belső rétegek katasztrofálisan összehúzódnak, és az így fölszabaduló gravitációs energia szétrobbantja a külső rétegeket, ráadásul a fúziót is beindítja bennük, ami aztán még több energiát szabadít föl. Ez a robbanás az, ami II-es típusú szupernóvaként mutatkozik meg, és aminek az energiája még olyan atommag-reakciókat is képes kiváltani, amelyek energiát nyelnek el.

Az ilyen szupernóvák összeroppanó magja valószínűleg neutroncsillag lesz, még ha a tömege (a csillag fölrobbant külső rétegeit levonva) nem is lenne túl nagy ahhoz, hogy fehér törpe keletkezzék belőle. Az összeroppanás olyannyira katasztrofális, hogy a csillag magja – hogy úgy mondjam – megállás nélkül robog át a fehértörpeállomáson.

FEKETE LYUKAK

Még a II-es típusú szupernóvák esetében sem föltétlenül neutroncsillagok jönnek létre.

Oppenheimer, amikor 1939-ben kidolgozta a neutroncsillag elméletét, azt is megvizsgálta, milyen következményekkel járhat, ha a csillag tömege növekszik. A tömegnövekedéssel együtt természetesen a csillag gravitációs térereje is megnő. Ha meghaladja a Nap tömegének 3,2-szeresét, a gravitációs tér annyira erős lesz, hogy még az érintésnyi közelségben levő neutronok sem képesek ellenállni a tér által kifejtett nyomásnak. A neutronok összeroppannak, a neutroncsillag összehúzódik és egyre sűrűbbé válik; ezáltal a kicsiny csillag környezetében a gravitációs tér még erősebb lesz, és az összehúzódás még gyorsabban folytatódik.

Ha egyszer a neutronok összeroppantak, akkor semmilyen ismert erő sem állíthatja meg az összehúzódást – gondolta annak idején Oppenheimer, és a mai tudósok is ezen a véleményen vannak. Arra kell tehát következtetnünk, hogy a sűrűsödés határtalanul folyik tovább, úgyhogy a csillag a nulla térfogathoz és a végtelen nagy sűrűséghez közeledik. Ezt ne úgy értsük, hogy mind kisebb és kisebb méretű, ugyanakkor egyre nagyobb és nagyobb sűrűségű neutroncsillaggal lesz dolgunk. Az összehúzódás következtében alapvető változás áll be.

Hogy ennek a mibenlétét megérthessük, képzeljük el, hogy a Föld felszínéről feldobunk egy tárgyat! Miközben fölfelé halad, a Föld gravitációs tere állandóan vissza, lefelé húzza. Emiatt a fölfelé irányuló sebesség folyvást csökken. Végül a tárgy elérkezik egy holtpontra, és a következő pillanatban lefelé kezd esni.

Ha a Föld gravitációs térereje a fölfelé vivő úton végig egyforma volna, akkor teljesen mindegy lenne, hogy mekkora a földdobott tárgy kezdősebessége. Végül is 100 méter vagy 100 kilométer vagy 100 000 kilométer után a sebesség nullára csökkenne, a tárgy pedig elkezdene visszafelé esni a Földre.

Csak hogy a gravitációs tér fölfelé haladva nem állandó, hanem a Föld középpontjától mért távolság négyzetével arányosan gyengül.

A Föld felszínén lévő tárgy 6370 kilométerre van a középponttól. Ha 6370 kilométer magasságban van a felszín fölött, akkor a középponttól mért távolság ennek a duplája, a Föld gravitációs terének erőssége pedig a felszínének egynegyede, s a magasság növekedésével ugyanígy csökken tovább. A Hold távolságában a Föld gravitációs térereje már 3500-szor kisebb, mint a felszínen.

Ha egy tárgyat elég nagy sebességgel lövünk föl, akkor – úgymond – le tudja győzni a gravitációs teret. Ez ugyan lassítani fogja, de közben nagy sebességgel emelkedik, a tér olyan rohamosan gyengül, hogy az egyre kisebb gravitációs vonzás sohasem bírja nullára csökkenteni a fölfelé irányuló sebességet. Így a tárgy ki tud szökni a Föld gravitációs teréből, és akár vég nélkül vándorolhat a

világegyetemben. Ettől még persze megmarad egy másik, a Földnél nagyobb tömegű objektum (vagyis a Nap) fogságában, vagy vándorlása során összeakadhat egy másik testtel, amellyel aztán vagy összeütközik, vagy pályára áll körülötte.

Azt a legkisebb sebességet, amellyel egy, a Föld felszínéről induló tárgy éppen hogy megszökhet a gravitációs térből, *szökési sebesség*nek hívjuk. A Föld esetében ez a szökési sebesség 11,2 kilométer/másodperc.

Egy nagyobb tömegű, következésképp erősebb gravitációs térrel rendelkező égitest természetesen nagyobb felszíni szökési sebességet követel meg. A Jupiteren ez az érték 60,5, a Nap esetében pedig 617 kilométer/másodperc.

Ha egy csillag összehúzódik, felszínén a gravitációs tér annál erősebbé válik, minél közelebb kerül a felszín a középponthoz, még akkor is, ha az össztömeg eközben nem változott meg. A csillagászok által elsőként vizsgált fehér törpének, a Szíriusz B-nek a tömege például hozzávetőleg ugyanakkora, mint a Napé, de a felszíne sokkal közelebb van a középpontjához. A Szíriusz B felszíni gravitációja ezért sokkal erősebb, a felszíni szökési sebessége pedig körülbelül 4900 kilométer/másodperc.

Minél nagyobb valamely égitest esetében a szökési sebesség, annál nehezebben szökhet meg róla bármi is, és annál kisebb a valószínűsége, hogy ezt valami tényleg meg fogja tenni.

Az utóbbi negyedszázadban rakétáink sebessége elég nagy lett ahhoz, hogy elhagyhassuk a Föld gravitációs terét, de ha bolygónk felszíni gravitációja valamiképpen a Jupiterére növekedne, akkor (eltekintve most az ezzel járó egyéb kényelmetlenségektől) technikai szakértelmünk azonnal csődöt mondana az űrrakéták fölbocsátásában.

Egy, a Napéval egyenlő tömegű neutroncsillagon a szökési sebesség körülbelül 200 000 kilométer/másodperc. Ezen a ponton nem egyszerűen mai technikánk elégtelen bárminek a fölbocsátásához, hanem ez szinte teljesen lehetetlen. Az egyedüli objektumok, amelyek normális esetben elég gyorsan mozognak ahhoz, hogy képesek legyenek elhagyni egy neutroncsillagot, a piciny tömegű vagy tömeggel egyáltalán nem is rendelkező nagyenergiájú részecskék. A nagyenergiájú elektronok és a neutrínók bírnak megszökni, valamint a fényt és a hasonló sugárzásokat alkotó fotonok.

Ha egy neutroncsillag összeroppant, a gravitációs erő korlátlanul növekszik, és a szökési sebesség is egyre nagyobb lesz. Egy ponton ez utóbbi eléri a 300 000 kilométer/másodpercet. Ennyi a fény terjedési sebessége vákuumban, és mint a német fizikus, *Albert Einstein* (1879-1955) 1905-ben bebizonyította, ez az egyáltalában elérhető legnagyobb sebesség. Ezt egyetlen tömeggel rendelkező dolog sem tudja elérni, és még a fénysebességgel haladó tömeg nélküli részecskék sem léphetik túl ezt az értéket.

Ez azt jelenti, hogy miután az összeroppantó neutroncsillag elérte

ezt az állapotot, már semmi sem távozhat róla (kivéve bizonyos nagyon különleges körülményeket, amelyek most nem kell hogy érdekeljenek bennünket). Ha valami összeütközik vele, az úgy viselkedik, mint ami egy végtelenül mély lyukba esett, amelyből sohasem tud ismét kiemelkedni. Még a fény sem szökhet meg róla. *John Archibald Wheeler* (1911–) amerikai fizikus *fekete lyuk* néven írta le az ilyen objektumot, s ez az elnevezés egy csapásra átment a köztudatba.

Mindebből az következik, hogy ha egy szupernóva összehúzódó magjának tömege több mint 3,2-szer nagyobb a Nap tömegénél, akkor az keresztülrohan a fehértörpe- és a neutroncsillag-állomásokon, és a fekete lyuknál köt ki.

Így a II-es típusú szupernóvák, bár gyakran neutroncsillagot eredményeznek, ugyancsak gyakran válnak fekete lyukakká. Mivel tehát neutroncsillag csak az egyik típusú szupernóvából jön létre, és még abból sem mindig, nem csodálható, hogy kevesebb pulzár van, mint amennyit a szupernóvák száma alapján várnánk.

A fekete lyukak és a neutroncsillagok között van egy gyakorlati szempontból nagyon fontos különbség: a fekete lyukakat szinte lehetetlen észrevenni.

Egy neutroncsillagot elég könnyű kimutatni az általa kibocsátott sugarak révén. Egy fekete lyukról viszont nem mondható el, hogy bármit is kibocsátana – még sugárzást sem. A szokásos technikák, amelyekkel más csillagászati objektumokat észlelünk, egy magában álló fekete lyuk esetében egyszerűen csődöt mondanak.

Egy magányos fekete lyukat csak abban az esetben vagyunk képesek észlelni, ha elég közel van, vagy elég nagy tömegű ahhoz, hogy gravitációs hatást gyakoroljon ránk, vagy éppenséggel mindkettő fönnáll egyszerre. Elméletileg akár az egész Galaktika tele lehet hintve milliányi, a közönséges csillagokkal egyező tömegű fekete lyukakkal anélkül, hogy erről tudomást szereznénk.

Ha magából a fekete lyukból nem is, az objektum szomszédságából mégiscsak jöhet sugárzás. Egy fekete lyuk sosem igazán magányos. Mindig van a közelében anyag, ha egyéb nem, hát a csillagközi térben bár gyéren, de azért megtalálható atomok és porfoszlányok. A fekete lyukhoz közeledő anyag, még ha csak apró darabonként is, akkréciós koronggá állhat össze körülötte. Lassan-lassan ez az anyag spirálisan leereszkedik a fekete lyukba, és röntgenhullámok formájában szinkrotronsugárzást bocsát ki.

De ha egy fekete lyukat csupán a csillagközi anyag veszi körül, az általa kibocsátott röntgensugárzás annyira gyöngye, hogy alig vagy egyáltalán nem észlelhető, és nem nyújt számunkra hasznosítható információt.

Tételezzük föl azonban, hogy a fekete lyuk egy bőséges anyagforrás közelében helyezkedik el, amelyből folytonosan nagy anyagmennyiség áramlik át hozzá spirális pályán! Ez a folyamat erős röntgensugárzást termel. Pontosan ez játszódik le egy szoros kettős-csillag esetében, amely nívát vagy akár I-es típusú szupernóvát eredményez, ha az egyik partner fehér törpe.

Ha ez a partner fekete lyuk, akkor a robbanás természetesen nem is kérdéses. A fekete lyuk, ahogy az anyagot nyeli, egyre nagyobb tömegű lesz, mivel tömegének nincs felső határa. A beérkező anyag azonban, ahogy a fekete lyuk nő, állandóan röntgensugárzást bocsát ki – s ezt az égbolt egy olyan pontjáról kapjuk, ahol egyébként semmit sem lehet látni.

Így fordult a csillagászok érdeklődése a röntgensugár-források felé.

1971-ben az „Uhuru” röntgensugár-figyelő mesterséges hold erős röntgenforrást talált a Hattyú csillagképben. Ennek szabálytalan változása kizárta azt, hogy neutroncsillagról lenne szó, inkább egy fekete lyukra engedett következtetni.

A csillagászok erre a forrásra összpontosították a figyelmüket, és mikrohullámú kisugárzást észleltek, amelynek a helyét is hajszálpontosan megállapították. A sugárzás forrása annak a látható csillagnak a közvetlen közelében volt, amely HD-226868 néven szerepel a katalógusokban. Ennek a nagyon nagy, forró, kékes csillagnak körülbelül harmincszor akkora a tömege, mint a mi Napunknak. A közelebbi vizsgálat során kettőscsillagnak bizonyult 5,6 napos keringési periódussal. A pálya jellegéből megállapítható, hogy a kettős másik tagja a Napnál ötször-nyolcszor nagyobb tömegű.

Ez a társcsillag azonban, bár erős röntgenforrás, láthatatlan. Ha nem látható, akkor igen-igen kisméretűnek kell lennie. Mivel ahhoz túl nagy a tömege, hogy fehér törpe vagy neutroncsillag lehessen, arra kell következtetnünk, hogy ez a láthatatlan csillag nem más, mint egy fekete lyuk.

A HD-226868 továbbá tágulni látszik, mintha vörös óriássá kezdene válni. Nagyon valószínű ezért, hogy anyaga a kísérőjébe, a fekete lyukba áramlik át, és a fekete lyuk körüli akkréciós korong termeli a röntgensugarakat.

Ha föltesszük, hogy a HD-226868 kísérője egy fekete lyuk (erre egyelőre csak közvetett bizonyítékunk van), akkor nem lehet kétséges, hogy egy hajdani szupernóva maradványa.

A TÁGULÓ VILÁGEGYETEM

Bár a szupernóvák minden képzeletet fölülmúlóan káprázatos robbanások, korántsem a lehető legnagyobbak. Néhány „aktiv galaxisban” az egész galaxismag robban, sokkal hosszabb időn át termelve sokkal több energiát, mint amire egy szupernóva képes. Sőt, még tovább is mehetünk.

Mi több, muszáj is tovább mennünk, mert csak így tudjuk áttekinteni, milyen hatással vannak ránk a szupernóvák.

Joggal kérdezhetjük: létezik ilyen? Egyáltalában gyakorolhat ránk bármilyen hatást egy szupernóva?

Első pillantásra úgy tűnik, semmilyen gyakorlati szempontból sem lehet hozzánk semmiféle köze. A létező csillagoknak mindössze kis töredéke robban föl nóvaként vagy szupernóvaként, és egyetlen közeli csillagról sem tudunk, amely a belátható jövőben ezt megtehetné.

Ha a Nap maga olyan csillag lenne, amely egyszer csak nóvává vagy szupernóvává válhat, akkor bizonyára heves izgalommal összpontosítanánk erre minden figyelmünket – Napunk azonban biztonságban van. Tömege nem elég nagy ahhoz, hogy valaha is II-es típusú szupernóvaként robbanjon föl, ugyanakkor egy szoros kettős rendszernek sem tagja, tehát I-es típusú szupernóva sem lesz belőle – de még egy icipici közönséges nóvácska sem.

Igazából be lehet bizonyítani: egyetlen olyan csillagnak sem lehet értelmes életet hordozó bolygója, amely alkalmas arra, hogy nóvává vagy szupernóvává váljék.

Ha egy csillag tömege elég nagy ahhoz, hogy II-es típusú szupernóva lehessen belőle, akkor könnyen kimutatható: ahhoz ez a tömeg túl nagy, hogy annyira hosszú időt töltsön a fősorozaton, amíg az élet eljut az értelmes lények kifejlődéséig.

Ha viszont a tömege nem nagyobb a Napnál, de tagja egy szoros kettősnek, úgyhogy egyszer csak nóvaként vagy I-es típusú szupernóvaként robbanhat föl, akkor nem képzelhető el olyan bolygópálya e körül a kettős körül, amely kellőin stabil környezetet biztosítana az élet keletkezéséhez.

Nos, akkor mit nyújthatnak nekünk a nóvák és a szupernóvák? Nem azt kell-e megállapítanunk, hogy (leszámítva nagy ritkán egy-egy futó pillantást az ég pár gyönyörűen ragyogó csillagára) semmit sem kapunk tőlük, sem jót, sem rosszat, és a leghelyesebb, ha meghagyjuk őket a csillagászoknak és a tudományos-fantasztikus regények íróinak?

Éppenséggel ilyen következtetésre is juthatunk, de csak akkor, ha egyáltalán nem érdekel bennünket, hogyan alakult ki a világ, honnan lett a Nap és a Föld, hogyan fejlődött ki az élet, és milyen veszélyek leskelődnek ránk a jövőben – a robbanó csillagok ugyanis mindezekkel a legszorosabban összefüggnek.

Nézzük először azt, hogy miként jött létre a világegyetem!

Egészen a legutóbbi időkig a legtöbb (ha nem minden) kultúrában, a sajátunkat is beleértve, úgy gondolták, hogy a világ rövid idő leforgása alatt, egy természetfölötti lény mágikus tevékenysége révén jött létre, méghozzá nem is olyan régen.

Az európai kultúrában meghatározó szerepet játszó kereszténység szerint a világot Isten hat nap alatt teremtette, hozzávetőlegesen hatezer évvel ezelőtt. Erre persze semmilyen fizikai bizonyíték nincs, ez a hit pusztán a *Biblia-beli Genézis könyve* első fejezetének állításain

alapszik. Mégis csak kevesen merészeltek ezzel kapcsolatos kételyüknek hangot adni – már akiknek egyáltalán volt ilyen kételyük. Miután a modern csillagászat kiderítette, hogy a világegyetem milyen nagy, sőt a tudomány fejlődésének minden további lépése egyre hatalmasabbnak, végül is elképzelhetetlenül óriásinak mutatta, nehézzé, sőt tulajdonképpen teljesen lehetetlenné vált, hogy egy racionális emberi lény a teremtés bibliai meséjét betűről betűre igaznak higgye.

Ugyanakkor viszont a csillagászati megfigyelések még semmiféle magyarázatot sem adtak arra, hogy hogyan keletkezett a világ tisztán természeti úton.

Laplace köd-hipotézise érdekes és kézenfekvő leírás arról, miként alakulhatott ki a Naprendszer egy lassan forgó por- és gáztömegeből – de honnan volt a por és a gáz?

Föltehető, hogy eredetileg a Galaktika valamennyi csillaga ugyanígy keletkezett. Lennie kellett tehát egy galaxisméretű por- és gázfelhőnek, amely csillagok és bolygórendszerek milliárdjaivá alakult át. Sőt, amikor az 1920-as években rájöttek, hogy számtalan galaxis létezik, ez azt jelentette, hogy kezdetben számtalan ilyen por- és gáztömegnek kellett lennie. Honnan származtak ezek? Milyen magyarázatot adhatunk a milliárd parszeknyi átmérőjű univerzumban szétszórta óriási por- és gáztömegek eredetére anélkül, hogy egy mindenható természetfölötti lényhez kellene folyamodnunk?

Az 1910-es években aztán olyan megfigyeléseket hajtottak végre, amelyeknek ugyan látszólag semmi közük sem volt ehhez a problémához, mégis elvezettek a vele kapcsolatos elgondolásaink forradalmasodásához.

Azzal kezdődött, hogy *Vesto Melvin Slipher* (1875-1969) amerikai csillagász 1912-ben fölvette az Androméda-galaxis színeképét. (Ekkor még azt sem tudták, hogy egyáltalában galaxisról van szó.) A színeképből megállapította, hogy az 200 kilométer/másodperces sebességgel közeledik felénk.

Megfigyelte ugyanis, hogy a színekép azonosítható sötét vonalai szokott helyükről a spektrum ibolya vége felé tolódnak el. Az eltolódás iránya alapján meg lehetett mondani, hogy az Androméda-galaxis közeledik, az eltolódás mértékéből pedig a közeledés sebességét is ki lehetett számítani. A számítás azon az elven alapult, amelyet *Johann Christian Doppler* (1803-1853) osztrák fizikus fejtett ki először 1842-ben.

Ezt a „Doppler-effektust” eleinte a hanghullámokra vonatkoztatták, de *Armand H. L. Fizeau* (1819-1896) francia fizikus 1848-ban kimutatta, hogy az elv a fényhullámokra is érvényes. A „Doppler-Fizeau-effektus” értelmében ha bármilyen, fényt kibocsátó tárgy (legyen az gyertya vagy csillag) színeképvonalai az ibolya felé tolódnak el, akkor a fényforrás közeledik hozzánk; ha viszont a vörös felé tolódnak el a vonalak, akkor a fényforrás távolodik tőlünk.

Ezt az elvet *William Huggins* alkalmazta először egy csillagra

1868-ban. Azt kapta, hogy a Szíriusz valamelyes *vöröseltolódást* mutat, ennél fogva távolodik tőlünk. A következő években más csillagokat is megvizsgáltak ezen a módon. Némelyikük közeledett, mások pedig távolodtak 100 kilométer/másodpercig terjedő sebességgel.

A Doppler–Fizeau-effektus egy szempontból különösen hasznosnak bizonyult. Ha a csillagok *sajátmozgását* (vagyis a látóvonalra merőleges mozgását) akarjuk megmérni, az csak a meglehetősen közeli csillagok esetében sikerül. Ezért aztán csak nagyon kevés csillagnak van mérhető sajátmozgása. Viszont a *sugárirányú mozgás* (a közeledés vagy távolodás) a Doppler–Fizeau-módszerrel bármilyen távoli csillag esetében meghatározható – már ha elég fényes ahhoz, hogy színeképet szolgáltatson.

Ha egyszer az Androméda-galaxisnak le lehet fényképezni a spektrumát, az már nem számít, hogy 700 000 parszeknyi távolságban van (amiről persze Sliphernek fogalma sem volt). A Doppler–Fizeau-effektus itt is ugyanúgy működik, mint a Szíriusz vagy akár egy közeli gyertya esetében. Az *ibolyaeltolódás* az Androméda-galaxis színeképében közeledésre utalt, s ebben nem volt semmi meglepő. A közeledés sebessége némiképp nagy volt, mivel mindaddig nem találtak ekkora sebességgel közeledő vagy távolodó csillagot, mindazonáltal az Androméda-galaxisról kialakult kép sem ütött el túlságosan a többitől.

Slipher ezután tizennégy további galaxis (vagy ahogy ő hitte: köd) színeképét vizsgálta meg, és azt találta, hogy közülük mindössze egy közeledik az Andromédához hasonló módon. Az összes többi távolodik, mégpedig 200 kilométer/másodpercnél jóval nagyobb sebességgel.

Ez már tényleg meglepő, csak hogy az igazi meglepetés még hátra volt.

Az 1920-as években, amikor eljutottak annak fölismeréséig, hogy a fehér ködök valójában galaxisok, *Milton La Salle Humason* (1891-1972) amerikai csillagász, aki Hubble-lal dolgozott együtt, százával kezdte fényképezni a galaxisok színeképét. Azt találta, hogy kivétel nélkül mindegyik vöröseltolódást mutat: valamennyien távolodnak!

Sőt mi több, minél halványabb (és ezért föltehetően távolabbi) egy galaxis, annál nagyobb a vöröseltolódása és annál gyorsabban távolodik. 1929-ben Hubble föltételezte, hogy itt egy általános szabály érvényesül – ez az úgynevezett „Hubble-törvény”. Ez a szabály kimondja, hogy a galaxisok távolodási sebessége arányos a tőlünk való távolságukkal. Ha egy galaxis ötször olyan messze van, mint egy másik, akkor ötször akkora sebességgel is távolodik.

A Hubble-törvény teljes mértékben megfigyeléseken, a vöröseltolódás mérésén alapul. Ezek a megfigyelések azonban még épp hogy elkezdődtek, amikor a dologgal kapcsolatban már egy elméleti megfontolás is született.

1916-ban Einstein megalkotta általános relativitáselméletét,

amely először lépett túl a gravitáció newtoni szemléletén. Ez az elmélet egy sor „téregyenletet” tartalmazott, amelyeket föl lehetett használni a világegyetem mint egész leírására.

Einstein úgy vélekedett, hogy téregyenletei egy statikus világegyetemet írnak le, amely egészében véve stabil és nem változik. 1917-ben azonban *Willem de Sitter* (1872-1934) holland csillagász bebizonyította: ezeket az egyenleteket úgy is lehet értelmezni, hogy azt mutatják, az univerzum folytonosan tágul. A *táguló világegyetem* elképzelése hamar népszerű lett, s maga Einstein is elfogadta.

A „BIG BANG”

Ha a világegyetem valóban tágul, akkor mindennap nagyobb, mint tegnap volt. Ha viszont képzeletben visszafelé megyünk az időben, mintha visszafelé vetítenénk egy filmet, azt látjuk, hogy napról napra kisebb lesz.

Az univerzum végtelenül hosszú ideig tágulhat anélkül, hogy a végére érne. Az összehúzódás viszont nem folytatódhat a végtelenségig, hiszen végül is nullává kell zsugorodnia, s akkor már nem húzódhat tovább össze. Ez a „nulla” a világegyetem kezdetét kell hogy jelezze.

Elsőül *Alekszandr Alekszandroviics Fridman* (1888-1925) orosz matematikus világított rá erre, aki 1922-ben alkotott ilyen képet a táguló univerzum matematikai elemzése révén. Azonban nem sokkal ezután meghalt anélkül, hogy művét befejezhette volna.

Tőle függetlenül *Georges Edouard Lemaitre* (1894-1966) belga csillagász is hasonló elméletet dolgozott ki 1927-ben. Föltételezte, hogy kezdetben a világegyetem összes anyaga egy piciny térfogatban zsúfolódott össze, s ezt „kozmosz tojásnak” hívta. Ez a térfogat erőteljesen tágulni kezdett, és még most is tágul.

Amikor 1929-ben Hubble megalkotta törvényét és leírta az alapjául szolgáló megfigyeléseket, kiderült, hogy ez pontosan megfelel annak, amit egy táguló világegyetemtől várni lehet. Az, hogy minden galaxis távolodik tőlünk (mégpedig annál nagyobb sebességgel, minél messzebbre van), semmi különösét sem mond rólunk vagy a Galaktikáról. Táguló világegyetem esetén valamennyi galaxis egyaránt távolodik az összes többitől. Ha a sajátunk helyett bármely másik galaxisról néznénk az univerzumot, a Hubble-törvényt mindenképpen érvényesnek találnánk.

El kell ismernünk, hogy az Androméda és néhány más közeli galaxis nem távolodik, de ezek mind a *lokális csoport* tagjai. Ez a galaxis-halmaz magában foglalja a mi Galaktikánkat és az Androméda-galaxist is. Ezeket a gravitációs erő köti egymáshoz, és egy közös tömegközéppont körül mozognak, úgyhogy valamely adott időpontban némelyikük távolodik tőlünk, mások pedig közelednek.

Látjuk tehát: a táguló világegyetem nem azt jelenti, hogy az egyedi

galaxisok, hanem hogy a galaxishalmazok távolodnak valamennyi többitől. A galaxishalmazok azok az egységek, amelyekből az univerzum fölépül.

Egy orosz-amerikai fizikus, *George Gamow* (1904-1968) volt az, aki a táguló „kozmosz tojás” elméletét magáévá tette és népszerűsítette. A kezdeti tágulást mint „big bang”-et („nagy bumm”-ot, ősrobbanást) emlegette, és e kifejezés azonnal elfogadottá vált, s ma is használatos. Ez a legnagyobb robbanás, amely világegyetemünkben egyáltalán elképzelhető – összehasonlíthatatlanul nagyobb, mint amekkora egy szupernóvától kitelik.

Gamow megjósolta, hogy a „big bang”-et kísérő sugárzásnak minden irányból jövő gyenge mikrohullámú hullámokként ma is észlelhetőnek kell lennie, s ennek bizonyos jellemzői kiszámíthatók.

Ezt az elképzelést *Robert Henry Dicke* (1916–) amerikai fizikus fejlesztette tovább. 1964-ben *Arno Allan Penzias* (1933–) német-amerikai fizikus és kollégája, *Robert Woodrow Wilson* (1936–) amerikai csillagász meg is találta ezt a „mikrohullámú háttérsugárzást”, amely valóban megfelelt Gamow és Dicke elméleti előrejelzéseinek.

Ettől a fölfedezéstől fogva a csillagászok egyre inkább elfogadták a „big bang” létezését. Ma már általánosan elterjedt az a föltételezés, hogy a világegyetem körülbelül tizenöt milliárd évvel ezelőtt egy aprócska objektumnak indult. (A pontos számérték még vitatott, de aligha kevesebb tízmilliárd évnél, és nem több húszmilliárdnál.)

Esszerűbbnek látszik azt föltételezni, hogy a világmindenség nagyon kicsiny objektumként jött létre és fokozatosan fejlődött a galaxishalmazok ma meglevő óriási, változatos gyűjteményévé, mint abban hinni, hogy valamiképp a mai formájában teremtődött. Mindazonáltal még mindig ott a kérdés, hogyan jött létre a világegyetem eredeti formájában, aprócska objektumként. Hivatkoznunk kell-e ezen a ponton valamiféle természetfölkötti eredetre?

Egyes fizikusok most azon törik a fejüket, hogy a világegyetem eredeti piciny állapota véletlen folyamat eredményeként alakult ki a semmiből, sőt az is lehet, hogy végtelen számú ilyen kicsi *protouniverzum* keletkezik folyamatosan a végtelen térfogatú semmiben, mi pedig a számtalanul sok világegyetem egyikében élünk.

A fizikusok legtöbbször azonban megelégszik azzal, hogy az ősrobbanásig kövesse vissza a világegyetemet, és ott magára hagyja. Jelentős a bizonytalanság e rendkívüli jelenség kezdeti állapotaival, valamint azzal kapcsolatban, hogy miként jutunk el a „big bang”-től a ma létező világegyetemig. A világejlődés legkorábbi állapotai ma is vitatottak.

Általában föltételezik például, hogy az univerzum kiterjedése kezdetben végtelenül kicsi, hőmérséklete viszont végtelenül magas volt; azonban a másodperc elképzelhetetlenül kis törtrésze alatt annyira megnőtt és lehűlt, hogy létrejöhettek az anyag végső alkotóelemei, a kvarkoknak nevezett részecskék.

Egy további hosszabb, mondjuk tízezred másodpercnyi időszak után a világegyetem már elég nagy és hideg volt ahhoz, hogy a kvarkok hármásával összetalálkozva olyan szubatomi részecskéket hozzanak létre, mint a protonok és a neutronok. Majd egy még hosszabb, most már több ezer éves időtartam elteltével kellően lehűlt ahhoz, hogy a protonok és a neutronok egymással egyesülve atommagokat alkossanak, amelyek elektronokat vonzottak magukhoz és komplett atomokká váltak. Egy ennél is hosszabb, legalább százmillió éves szakasz után csillagok és galaxisok kezdtek kialakulni, és létrejött a mai (habár a jelenlegi mércével mérve még nagyon kicsi) világegyetem.

Az 1970-es években kidolgozták a „big bang”-elmélet egy módosított változatát, amelyet „inflálódo univerzum” néven szokás emlegetni. Ebben aztán tényleg nagyon gyors kezdeti tágulással számolnak, s ez több tekintetben is módosítja a világegyetem fejlődésének részleteit.

Problémát okoz többek között az, hogy világunkat szinte kizárólag „közönséges” anyag alkotja, amely protonokból, neutronokból és elektronokból áll. Ezek viszont csak úgy keletkezhetek, hogy egyidejűleg ellenlábasaik: az *antiprotonok*, az *antineutronok* és az „*antielektronok*” (vagyis a *pozitronok*) is létrejöttek. Ez utóbbiak alkotják az *antianyagot*. Az univerzumnak egyenlő mennyiségben kellene tartalmaznia anyagot és antianyagot – de, amennyire megállapítható, ez még sincs így: szinte kizárólag közönséges anyaggal találkozunk.

(Egyébként ez a szerencsénk. Ha ugyanis a világmindenség azonos mennyiségű anyagból és antianyagból állna, akkor e kettő, amint létrejött, rögtön egyesülne is, megsemmisítve egymást – ezt nevezik idegen szóval *annihilációnak* –, és csupán sugárzás maradna utánuk. Ebben az esetben tehát világunk nem is létezhetne.)

„Nagy Egyesített Elméletek” (angolul Great Unified Theory, rövidítve: GUT) néven olyan új elméleteket dolgoztak ki, amelyek számot adnak az anyag viselkedéséről az ősrobbanás utáni első pillanatokban fönnálló nagyon magas hőmérsékleteken. Ezekből az látszik következni, hogy az anyag létrejöttében volt egy kicsinyke aszimmetria: közönséges anyagból egymilliárdod résszel több keletkezett, mint antianyagból. Amikor az anyag és az antianyag egyesült és annihilálódott, akkor az anyagnak ez a milliárdod része megmaradt, s ebből alakultak ki azután a galaxisok.

Az ősrobbanás másik nagy problémája az univerzum „szemcsés” volta. A „big bang” gömbszimmetrikus kellett hogy legyen, azaz a tágulásnak bármely irányban ugyanolyannak kellett lennie. A világegyetemnek tehát atomok egyenletesen eloszló sokaságából, valamiféle homogén gázból kellene állnia. Mi tette mégis, hogy ez a gáz sillagokká és galaxisokká állt össze?

Az inflálódo univerzum elmélete, úgy tűnik, képes magyarázatot adni erre a szemcsésességre, s talán nincs messze az idő, amikor a világ keletkezésének természeti koncepciójában ma még megleyő valamennyi nehézség eloszlik.

Az elemek

MIBŐL ÁLL A VILÁGMINDENSÉG?

A kicsiny, rendkívül forró univerzum biztosan már a „big bang” utáni legelső időszakban eléggé kitágult és lehűlt ahhoz, hogy a protonok és neutronok egyesülni tudjanak és atommagokat hozzanak létre. De vajon milyen anyagok keletkeztek és milyen arányban? Ez a *kozmogónia* (a világegyetem eredetét kutató tudományág) egyik érdekes problémája, és bennünket is ez vezet majd vissza a nóvákhöz és a szupernóvákhöz. Nézzük meg ezért valamivel részletesebben!

Atommag rengetegféle van. Hogyan teremthetünk közöttük rendet? Például úgy, hogy a protonjaik száma szerint osztályozzuk őket. Ez a szám egytől egészen száz fölöttig bármekkora lehet.

Minden proton + 1-es elektromos töltéssel rendelkezik. Rajta kívül a magban csak egyfajta részecske található, a neutron, s ennek nincs elektromos töltése. Az egyetlen protont tartalmazó mag töltése + 1; amelyiknek két protonja van, azé + 2 lesz; tizenöt proton esetén + 15, és így tovább. Egy adott magban a protonok számát, vagyis a mag elektromos töltését megadó számértéket *rendszám*nak nevezzük.

Ahogy a világegyetem tovább hűlt, a magok képessé váltak arra, hogy bizonyos számú elektront fogjanak be. Az elektronok mindegyikének — 1-es elektromos töltése van, és mivel az ellentétes töltések vonzzák egymást, a negatív elektron a pozitív mag szomszédságában igyekszik maradni. Normális körülmények között egy magában álló atommag a protonjaival egyező számú elektront tud fogva tartani. Ha a magban lévő protonok száma egyenlő a körülötte levő elektronok számával, akkor a mag és az elektronok összes elektromos töltése nulla; ez a társulás nem más, mint egy semleges atom. Egy ilyen semleges atomban a protonok és elektronok száma egyaránt a rendszámmal egyenlő.

Az olyan anyagot, amely csupa azonos rendszámú atomból épül föl, *elemnek* nevezzük. A hidrogén például elem, mivel csakis olyan atomokat tartalmaz, amelyek magja egy protonból áll, és a proton körül egy elektron található. Ez a hidrogénatom, magja pedig a hidrogénmag. A hidrogén rendszáma ennek megfelelően 1 lesz.

Több oldal rossz minőségű ábra eltávolítva

Hasonlóan, a hélium az az elem, amely héliumatomokból épül föl. A héliummagoknak két protonjuk van, így ennek az elemnek 2 lesz a rendszáma. Ugyanígy a lítium rendszáma 3, a berilliumé 4, a bóré 5, a széné 6, a nitrogéné 7, az oxigéné 8, és így tovább.

Ha a kémiai elemzés (latin eredetű nevének: analízis) számára hozzáférhető anyagokat (a Föld légkörét, az óceánokat, a talajt) tekintjük, akkor nyolcvanegy stabilis elemet találunk, azaz nyolcvanegy olyan elemet, amely nem változik meg, ha bármilyen hosszú ideig teljesen magára hagyjuk.

A Földön a legegyszerűbb atom (sőt mi több, ez a legegyszerűbb, amely egyáltalán létezhet) az 1-es rendszámú hidrogén. Azután jönnek a 2-es, 3-as, 4-es stb. rendszámúak, amíg csak a Föld legbonyolultabb stabilis atomjához nem érünk. Ez a bizmut, amelynek 83-as a rendszáma, a bizmutmagok mindegyike tehát nyolcvanhárom protont tartalmaz.

Mivel nyolcvanegy stabilis elem van, világos, hogy a rendszámok 1-től (hidrogén) 83-ig (bizmut) terjedő laktromáról kettőnek hiányoznia kell – és tényleg így is van. A negyvenhárom, illetve a hatvanegy protont tartalmazó atom nem stabilis, ezért sem a 43-as, sem a 61-es rendszámú elem nem fordul elő a vegyészek analizálta természetes anyagokban.

Ez nem jelenti azt, hogy 43-as, 61-es vagy 83-asnál nagyobb rendszámú elemek ideig-óráig sem létezhetnek. Az efféle atomok azonban nem stabilisak, így előbb-utóbb elbomlanak: egy vagy több lépésben stabilis atomokká alakulnak át. Ez nem megy föltétlenül végbe egyetlen pillanat alatt, hanem hosszú időt is igénybe vehet. A tóriumnál (rendszáma 90) és az urániumnál (rendszáma 92) évmilliárdokig tart, míg jelentős részük ólomá (rendszáma 82) válik.

Valójában a Föld létrejötte óta eltelt több milliárd év csupán az eredetileg jelen volt tórium és uránium egy részének elbomlásához volt elegendő. Az eredeti tóriumnak mintegy 80, az urániumnak pedig 50 százaléka mindeddig megúsza ezt, ezért ma is mindkettő megtalálható a földfelszín közzeteiben.

Bár mind a nyolcvanegy elem (plusz a tórium és az uránium) jelentős mennyiségben fordul elő a Föld „kérgében” (felszíni rétegeiben), közel sem egyenlő mértékben vannak jelen. Leggyakoribb az oxigén (rendszáma 8), a szilícium (rendszáma 14), az alumínium (rendszáma 13) és a vas (rendszáma 26).

Tömegét tekintve a Föld kérgének 46,6 százaléka oxigén, 27,7 százaléka szilícium, 8,13 százaléka alumínium és 5,0 százaléka vas. Négyen együtt a földkéregnek körülbelül hétnyolcadot részét teszik ki, míg a maradék egynyolcadot az összes többi elem együtt alkotja.

Ezek az elemek azonban ritkán fordulnak elő elemi formában. A különféle atomok összekeverednek és hajlamosak egymással társulni; az ilyen társulásokat nevezzük *vegyületeknek*. A szilíciumatomok és az oxigénatomok bonyolult módon kapcsolódnak össze egymással, a szilícium-oxigén társuláshoz pedig itt-ott vas, alumí-

Több oldal rossz minőségű ábra eltávolítva

nium és egyéb elemek atomjai kapcsolódnak. Az ilyen vegyületeket *szilikátoknak* hívjuk; ezek alkotják azokat a közönséges kőzeteket, amelyekben a földkéreg leginkább bővelkedik.

Mivel az oxigénatomok kisebb tömegűek a kéreg többi gyakori eleménél, adott tömegű oxigénben több atom van, mint valamely másik elem azonos tömegében. A Föld kérgének minden 1000 atomjából 625 az oxigén, 212 a szilícium, 65 az alumínium és 19 a vas. Így a földkéreg atomjainak 92 százalékát ez a négy teszi ki.

A Föld kérge azonban nem tükrözi hűen a világegyetem összetételét, sőt még a teljes Földét sem.

Mai ismereteink szerint a Föld „magja” (központi része, amely a bolygó tömegének egyharmadát jelenti) főleg vasból áll. Az ezt figyelembe vevő becslések szerint a Föld egész tömegének mintegy 38 százaléka vas, 28 százaléka oxigén, 15 százaléka pedig szilícium. A negyedik leggyakoribb elem nem az alumínium, hanem a magnézium (rendszáma 12), ez körülbelül 7 százalékkal részesedik. Négyen együtt a Föld egész tömegének hétnyolcadát adják.

Ha az atomok számát tekintjük, a Földnek mint egésznek minden 1000 atomjából körülbelül 480 az oxigén, 215 a vas, 150 a szilícium és 80 a magnézium, úgyhogy ez a négy nyújtja együttesen a földi atomok 92,5 százalékát.

A Föld azonban nem tipikus bolygója a Naprendszernek. A Vénusz, a Merkúr, a Mars és a Hold általános összetételüket illetően nagyban hasonlítanak a Földhöz, mivel mindegyikük kőzetekből épül föl, a Vénusz és a Merkúr esetében ráadásul a vasban gazdag mag is megtalálható. Ez valószínűleg még néhány holdra és a kisbolygók egy részére is igaz bizonyos fokig, csak hogy mindezek a sziklás égitestek (vasban gazdag mag ide vagy oda) fél százalékát sem teszik ki a Nap körül keringő valamennyi objektum össztömegének.

A Naprendszer tömegének (ha a Napot leszámítjuk) 99,5 százalékát a négy óriásbolygó: a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz adja. Ezek közül a legnagyobb, a Jupiter, egymagában az össztömeg valamivel több mint 70 százalékát jelenti.

Lehet, hogy a Jupiternek is van egy viszonylag kicsiny, kőzeteket és fémeket tartalmazó magja, de még ha így van is, az óriásbolygó tömegének zömét a szinképelemzési adatok és a bolygószondák tanúsága szerint a hidrogén és a hélium adja. A többi óriásbolygóval is ugyanez lehet a helyzet.

Ha most a Napot vesszük (ennek tömege 500-szor akkora, mint az egész bolygórendszeré együttvéve, a Jupitertől le a legkisebb porrészecskéig), akkor a szinképelemzési adatok alapján azt találjuk, hogy a zömét ennek is hidrogén és hélium alkotja. Közelebbről: tömegének hozzávetőleg 75 százaléka hidrogén, 22 százaléka hé-Hum, és 3 százalékot tesz ki az összes többi elem együttvéve.

Ha a Nap összetételét nem a tömeg, hanem az atomok száma szerint vizsgáljuk, akkor azt kapjuk, hogy minden 1000 atomjából

920 a hidrogén és 80 a hélium. Az összes többi elemet ezer közül nem egészen egy atom képviseli.

Mint hogy a Nap olyan összehasonlíthatatlanul nagyobb részét adja a Naprendszernek, nem tévedünk nagyot, ha elem-összetételét a Naprendszer egészére jellemzőnek tekintjük. A csillagok döntő többsége hasonló elem-összetételű, sőt kiderült, hogy a csillagok, illetve a galaxisok közötti teret kitöltő ritka gázok többnyire szintén hidrogénből és héliumból állnak.

Következésképp valószínűleg igazunk van, ha azt állítjuk: a teljes világegyetem minden 1000 atomjából 920 esik a hidrogénre, 80 a héliumra és kevesebb mint egy az összes többire.

A HIDROGÉN ÉS A HÉLIUM

Miért van ez így? Összefér-e egy hidrogén–hélium világegyetem a „big bang”-gel?

Hogyne, kétségkívül – legalábbis az eredetileg Gamowtól származó gondolatmenet szerint, amelyet azóta továbbfejlesztettek, de alapvetően nem változtattak meg.

Ez a következőképpen szól. A táguló világegyetem az ősrobbanás után azonnal a másodperc törtrésze alatt lehűlt annyira, hogy kialakulhattak az atomok ismerős alkatrészei: a protonok, a neutronok és az elektronok. De ez a hőmérséklet még mindig iszonyúan magas volt, így aztán semmi olyan sem létezhetett, ami ezeknél összetettebb. A részecskék nem kapcsolódhattak össze; ha ekkora hőmérsékleten ütköznek egymásba, egyszerűen visszapatannak.

Ami a proton-proton vagy neutron-neutron ütközéseket illeti, még a világegyetem jelenlegi, sokkal alacsonyabb hőmérsékletén is ugyanez a helyzet. Azonban ahogy a korai univerzum hőmérséklete tovább csökkent, végül lehetővé vált, hogy a proton-neutron ütközések eredményeként ez a két részecske összetapadjon. Kettejükét az úgynevezett *erős kölcsönhatás* (a négy ismert kölcsönhatás-fajta közül a legerősebb) tartja össze.

A magában álló proton a hidrogénmag, ahogy e fejezet korábbi részében elmagyaráztam. A proton-neutron együttes azonban szintén nem egyéb, mint egy hidrogénmag, hiszen egyetlen protont tartalmaz – márpedig ez az egyedüli feltétele, hogy egy magot hidrogénnek minősítsünk. A hidrogénmag e két változata (a proton és a proton-neutron) a hidrogén *izotópjai*, amelyeket a részecskék teljes száma szerint neveznek el: a proton, amely csupán egyetlen részecske, lesz a hidrogén-1 mag, a proton-neutron együttes pedig, amely összesen két részecske, a hidrogén-2 mag.

A korai világegyetemben uralkodó magas hőmérsékleten, amikor a különböző magok kialakultak, a hidrogén-2 nem volt túlságosan stabilis. Vagy különálló protonokra és neutronokra igyekezett ismét

szétesni, vagy további részecskékké próbált összetettebb (de esetleg stabilisabb) magokká egyesülni.

A hidrogén-2 mag ütközhet egy protonnal és hozzátapadhat; ekkor olyan mag keletkezik, amely két protonból és egy neutronból áll. Mivel ebben az együttesben két proton van, ez héliummag lesz; s mivel összesen három részecskéből áll, ez a hélium-3.

Ha a hidrogén-2 egy neutronnal ütközik össze és hozzátapad, akkor a létrejövő atommag egy protonból és két neutronból, összesen tehát ismét három részecskéből fog állni. Ez lesz a hidrogén-3.

A hidrogén-3 semmilyen hőmérsékleten, még a világűr mai hidegében sem stabilis; még akkor is belső változáson megy át, ha megvédjük az egyéb részecskékké való bármiféle kölcsönhatástól vagy ütközéstől. Két neutronja közül az egyik előbb-utóbb protonná alakul, így a hidrogén-3-ból hélium-3 lesz. Az átalakulás a jelenlegi körülmények között nem túlságosan gyors: a hidrogén-3 magok fele valamivel több mint tizenkét év alatt válik hélium-3-má. A korai világegyetem hihetetlenül magas hőmérsékletén ez nyilván gyorsabb volt.

Most tehát három olyan magunk van, amely mai körülmények között stabilis: a hidrogén-1, a hidrogén-2 és a hélium-3.

A hélium-3 részecskéi még gyöngébben kötődnek egymáshoz, mint a hidrogén-2-éi, és a korai világegyetem hőségében erősen törekszenek arra, hogy vagy szétváljanak, vagy további részecskéket vegyenek föl.

Ha a hélium-3 egy protonnal akad össze és az rá is tapad, akkor olyan atommagot kellene kapnunk, amely három protonból és egy neutronból áll. Ez lenne a lítium-4. A lítium-4 azonban semmilyen körülmények között sem stabilis: egyik protonja még a Föld felszínének alacsony hőmérsékletén is azonnal átalakul neutronná. Az eredmény egy olyan együttes, amely két protont és két neutronot tartalmaz, vagyis a hélium-4.

A hélium-4 nagyon stabilis mag, közönséges hőmérsékleten (a hidrogén-1 -et, vagyis az egyedülálló protont leszámítva) az ismert legstabilabb. Ha egyszer létrejött, akkor még nagyon magas hőmérsékleten sem igen bomlik el.

Ha a hélium-3 egy neutronnal ütközik és kapcsolódik össze, egyből hélium-4 keletkezik. Ha két hidrogén-2 mag ütközik és tapad össze, abból is hélium-4 lesz. Ha a hélium-3 egy hidrogén-2-be vagy egy másik hélium-3-ba ütközik, akkor megint csak hélium-4 jön létre, a fölösleges részecskék pedig különálló protonokként, illetve neutronokként lépnek ki. Így a hidrogén-2 és a hélium-3 rovására hélium-4 képződik.

Lényegében tehát amint a világmindenség lehűlése elért arra a pontra, hogy a protonok és a neutronok összetettebb magokká egyesülhettek, az első ilyen nagyobb mennyiségben keletkező atommag a hélium-4 volt.

Ahogy azonban a világegyetem tovább tágult és hűlt, a hidro-

gén-2 és a hélium-3 csökkenő valószínűséggel alakult tovább, és egy részük – hogy úgy mondjam – belefagyott a tartós létezésbe. Ma csak minden 7000 hidrogénatom között találunk egyetlen hidrogén-2-t. A hélium-3 még ritkébb: csupán minden milliommodik héliumatom ilyen.

A hidrogén-2 és a hélium-3 tehát elhanyagolható, és azt mondhatjuk: amint kellően lehűlt, az univerzum anyaga azonnal hidrogén-1 és hélium-4 magokká alakult. Tömegének 75 százalékát a hidrogén-1, 25 százalékát a hélium-4 adta.

Végül ott, ahol a hőmérséklet elég alacsony volt, a magok magukhoz tudták vonzani a negatív töltésű elektronokat; ezeket a pozitív magok *elektromágneses kölcsönhatással*, a négy kölcsönhatás-fajta közül a második legerősebbel ragadják meg. A hidrogén-1 mag egyetlen protonjához egyetlen elektron képes társulni, a hélium-4 mag két protonjához pedig kettő. Ily módon hidrogén- és héliumatomok jönnek létre.

Ezek szerint ami az atomok számát illeti, a világegyetem minden 1000 atomjából 920 lenne a hidrogén-1, 80 pedig a hélium-4.

Megvan a magyarázat a hidrogén-hélium világegyetemre.

De várjunk csak! Mi lesz a héliumnál nagyobb tömegű, magasabb rendszámú atomokkal? (A négynél több részecskét tartalmazó összes magot egy kalap alá vehetjük „nehéz atomok” néven.) Nagyon kevés nehéz atom van a világmindenségben, de azért csak vannak. Hogyan jöttek létre?

Logikusnak tűnik a válasz, hogy bár a hélium-4 nagyon stabilis, mégiscsak hajlamos lehet némiképp arra, hogy egy protonnal, neutronnal, egy hidrogén-2-vel, hélium-3-mal vagy egy másik hélium-4- gyel egyesüljön, kis mennyiségben ilyen vagy olyan nehéz atomot hozva létre, s ez lenne a forrása ezeknek a jelenlegi világegyetem tömegében nagyjából 3 százalékot kitevő atomoknak.

Sajnos, ez a válasz nem állja meg a helyét.

Ha a hélium-4 egy hidrogén-1 -gyel (egy magában álló protonnal) ütközik, és a kettő összetapad, akkor az eredmény egy olyan mag kellene hogy legyen, amely három protonból és két neutronból áll. Ez volna a lítium-5. Ha a hélium-4 egy neutronnal ütközik és kapcsolódik össze, akkor ez egy olyan magot eredményezne, amelynek két protonja és három neutronja van, vagyis egy hélium-5-öt.

Ha létrejönne is, sem a lítium-5, sem a hélium-5 nem maradna fenn a másodperc billiomodrészének néhány billiomodrészénél tovább, még a világűr mai hidegében sem. Ennyi idő alatt ismét hélium-4-re és egy protonra, illetve neutronra bomlanának el.

Annak esélye, hogy a hélium-4 egy hidrogén-2 vagy egy hélium-3 maggal ütközessen és tapadhasson össze, nagyon csekély, tekintettel arra, hogy ez utóbbiak rendkívül ritkák az őskeverékben. Az ily módon létrejövő nehéz atomok mennyisége túlságosan kicsiny ahhoz; hogy magyarázatot adhatna a mai arányokra.

Valamelyest több esély van arra, hogy egy hélium-4 mag egy

másik hélium-4-gyel ütközhesse és tapadhasson össze. Az ilyen dupla hélium-4 mag négy protont és négy neutronot tartalmazna, s ez lenne a berillium-8. Viszont a berillium-8 ugyancsak rendkívül kevésbé stabilis mag, és még a jelenlegi világegyetemben sem létezik a billiomod másodperc néhány századrészénél tovább. Mihelyt létrejött, máris ismét két hélium-4 magra esik szét.

Nagyot lendítene a dolgon, ha egyszerre három hélium-4 mag találkozna és kapcsolódna össze egy hármass ütközésben, erre viszont egy olyan keverékben, amelyben a hélium-4-et túlnyomórészt hidrogén-1 veszi körül, túlságosan kicsi az esély ahhoz, hogy számoljunk vele.

Következésképpen amikor a világegyetem annyira kitágult és lehűlt, hogy az összetett magok képződése végbemehetett, csakis a hidrogén-1 és a hélium-4 létezhetett számottevő mennyiségben. Ami neutron fölöslegben maradt, az protonná (hidrogén-1 -gyé) és elektronná bomlott. Nehéz atomok egyszerűen nem jöttek létre!

Egy ilyen világegyetemben a hidrogén-hélium gázfelhők galaxis-méretű tömegekre oszlanak szét, amelyek azután csillagokká és óriásbolygókká tömörülnek. Végére is a csillagok és az óriásbolygók szinte kizárólag hidrogénből és héliumból állnak. Van bármi értelme a kevéske nehéz atom miatt izgatni magunkat, amelyek a létező atomok tömegének mindössze 3 százalékát, számuknak pedig kevesebb mint 1 százalékát alkotják?

Van bizony! Erre a 3 százalékra muszáj magyarázatot lelnünk. Még ha a csillagokban és az óriásbolygókban elhanyagolhatóan kicsi is a nehéz atomok mennyisége, az olyan bolygók, mint a Föld, majdnem teljesen nehéz atomokból állnak.

Mi több, az emberi test (általában az élőlények) tömegének a hidrogén csak 10 százalékát teszi ki. Hélium egyáltalán nincs is bennünk. A tömeg fennmaradó 90 százalékát a nehéz atomok adják.

Más szóval, ha a világegyetem olyan marad, amilyen a „big bang” következtében az atommag-képződés folyamatának befejeződésekor volt, akkor a Földhöz hasonló bolygók léte és az általunk ismert élet teljességgel lehetetlen volna.

Mivel mi is a világon vagyunk, kellett hogy nehéz atomok jöjjenek létre. De hogyan?

SZÖKÉS A CSILLAGOKBÓL

Igazából ez már nem is olyan rejtély a számunkra, hiszen könyvünk egy korábbi helyén tisztáztuk, hogyan jönnek létre atommagok a csillagok szívében. Példának okáért a mi Napunk központi részeiben a hidrogén folyamatosan héliummá alakul, s ez a hidrogénfúzió szolgál a napenergia forrásául. Hidrogénfúzió az összes többi fősorozatbeli csillagban is folyik.

Ha ez lenne az egyedüli átalakulás, és ha ez a mai sebességgel

folytatódna vég nélkül, akkor az összes hidrogén fuzionálna, és a világegyetem úgy 500 milliárd év alatt (ez az univerzum jelenlegi korának harminc-negyvenszerese) tisztán héliummá válna. Csakhogy akkor hol maradnának a nehéz atomok?!

Ezek, mint már tudjuk, a csillagok belső övezetében jönnek létre, de csak akkor, amikor elérkezik az ideje, hogy elhagyják a fősorozatot. Ebben a kritikus pillanatban a csillagok legbelseje annyira sűrű és forró lesz, hogy a hélium-4 atommagok nagy sebességgel és nagy gyakorisággal fognak egymásba ütközni. Ha nagynéha három hélium-4 mag ütközik össze egyszerre és egymáshoz tapad, olyankor mindig egy stabilis mag képződik, amely hat protonból és hat neutronból áll. Ez a szén-12.

Hogyan lehetséges, hogy ma végbemennek hármass ütközések a csillagokban, a „big bang”-et követő időszakban viszont nem fordult elő ilyesmi?

Nos, amikor egy csillag elhagyja a fősorozatot, a legbelsejében a hőmérséklet megközelítőleg 100 000 000 °C, és a nyomás is iszonyatosan nagy. Ilyen hőmérséklet- és nyomásérték a nagyon korai univerzumban is előfordult, ám a csillag előnyösebb helyzetben van, mint a korai világegyetem volt: a fősorozatbeli csillagok belseje tiszta hélium-4-ből áll. Sokkal könnyebb három hélium-4-nek ütköznie össze olyankor, amikor másféle atommag egyáltalán nincs is jelen, mint amikor (az ősrobbanás utáni időkben) minden egyes hélium-4-et túlnyomórészt hidrogén-1 magok vesznek körül.

Vagyis a nehéz atommagok nem közvetlenül a „big bang” után, hanem a világegyetem egész eddigi története során a csillagokban jöttek létre. Sőt, még ma is keletkeznek a csillagok legbelsejében, és még évmilliárdokon át keletkezni is fognak. Nemcsak szénmagok jöttek és jönnek továbbra is létre, hanem ugyanígy az összes többi nehéz atommag, egészen a vasig – ez, mint korábban kifejtettem, a csillagokban szokásos fúziós folyamat végállomása.

Ebből két kérdés adódik számunkra:

Miután a csillagok közepében létrejöttek, hogyan szoktak szétszóródni a nehéz magok az egész világmindenségben, hogy végül a Földön és a mi testünkben is megtalálhatók legyenek?

Hogyan keletkeznek azok az elemek, amelyek atommagja nehezebb a vasénál? Mindent egybevéve, a legnehezebb stabilis atommag a vas-58, amely 26 protonból és 32 neutronból áll; csakhogy a Földön számos, ennél is jóval nehezebb mag létezik, egészen a 92 protonból és 146 neutronból álló urán-238-ig.

Birkózzunk meg előbb az első kérdéssel! Léteznek-e olyan folyamatok, amelyek révén a csillagok anyaga szanaszét szóródik a világ, egyetemben?

Léteznek, sőt néhányukat világosan láthatjuk is, ha saját Napunkat tanulmányozzuk.

Ha valaki (kellő elővigyázatosság mellett) szabad szemmel a Napba néz, nyugodt, tagolatlan fénygömbnek fogja látni. Mi azonban

már tudjuk, hogy örökké viharos állapotban van. A legbelsejében uralkodó rendkívül magas hőmérséklet áramlásokat idéz elő a felső rétegekben (mint egy, a tűzhelyen forrni kezdő fazék vízben). A napanyag hol itt, hol ott emelkedik meg és töri át a felszínt, úgyhogy a Nap felületét állandóan „szemcsék” (latin szóval: granulák) borítják. Ezek mindegyike igazából egy-egy áramlási oszlop, s kiterjedésük vetekszik a nagyobb amerikai államok, illetve európai országok területével, még ha a napfelszínről készült fényképeken csöppnyinek látszanak is.

Fölfelé szállva az áramló anyag kitágul és lehül, úgyhogy a felszínre érve lefelé kezd süllyedni, s helyét az alulról jövő forróbb anyag foglalja el. Ez a soha meg nem szűnő körforgás segít az energiát a csillag magjából a felszínre juttatni. A felszínről aztán ez az energia sugárzás formájában (nagyreszt látható fényként) kiszabadul az űrbe; a földi élet köztudottan ettől a sugárzástól függ.

Az áramlási folyamat időnként heves eseményeket idéz elő a felszínen, ezért aztán a sugárzáson kívül a tulajdonképpeni napanyagból is kilöködhet valamennyi az űrbe.

1842-ben teljes napfogyatkozást lehetett látni Franciaország déli, illetve Olaszország északi részéről. Akkoriban még ritkán vizsgálták meg az ilyeneket részletesen, mivel a fogyatkozások többnyire a jól felszerelt csillagászati obszervatóriumoktól távol voltak megfigyelhetők, és nem volt valami könnyű a rengeteg felszereléssel nagy távolságra elutazni. Az 1842-es napfogyatkozás azonban Nyugat-Európa csillagászati központjai közelébe esett, a csillagászok pedig összesereglettek, hogy műszereikkel tanulmányozhassák.

Ekkor vették először észre a Nap pereme körül azokat a lángoló, vöröses objektumokat, amelyek azonnal világosan láthatók lesznek, amint a Hold elfogja előlünk a napkorong ragyogását. Olyanok voltak ezek, mintha az űrbe kilövellő anyagnyalábok lennének; a nevük *protuberancia* (lángkilövellés) lett.

Egy ideig a csillagászok nem voltak biztosak benne, vajon a protuberanciák a Napból vagy pedig a Holdból indulnak ki, míg aztán 1851-ben újabb napfogyatkozás volt látható Európából, ezúttal Svédországból. A tüzetes vizsgálódás kiderítette, hogy a protuberanciák napjelenségek, a Holdhoz semmi közük.

Azóta is figyelmesen tanulmányozzák őket. Ma már alkalmas berendezésekkel bármikor vizsgálhatók, nem kell a teljes fogyatkozásra várni. Némelyik protuberancia rendkívüli módon ível fölfelé, és a napfelszín fölötti több tízezer kilométeres magasságba is elér. Egyik-másikuk robbanásszerűen tör sebességük akár 1300 kilométer/másodperc is lehet.

Bár a protuberanciák a leginkább látványosak a Nap felszínén megfigyelhető jelenségek közül, mégsem ezek a legnagyobb energiájúak.

1859-ben az angol *Richard Christopher Carrington* (1826-1875) pontszerű, csillagra emlékeztető fényrobbanást vett észre a Nap

felszínén, amely öt percig világított, azután kihunyott. Ekkor figyelték meg először a ma *napkitörésnek* (angol szóval: „fler”-nek) nevezett jelenséget. Carrington arra gondolt, hogy egy nagyméretű meteor zuhant a Napba.

Carrington észlelése mindaddig nem keltett különösebb figyelmet, míg *George Ellery Hale* (1868-1938) 1926-ban föl nem fedezte a *spektroheliográfot* (egy napszínkép-fényképező berendezést). Ez lehetővé tette, hogy a Nap fényét hullámhosszonként külön-külön vizsgálják. A napkitörés fénye nagyon gazdag bizonyos hullámhosszokban, és ha a Napot ezeken a hullámhosszokon nézik, a „fler”-ek igen fényeseknek mutatkoznak.

Ma már tudjuk, hogy a „fler” elég gyakori jelenség. A napfoltokhoz kapcsolódik, és amikor a Napnak különösen sok ilyen foltja van, akkor az apróbb „fler”-ek pár óránként, a nagyobbak néhány hetenként jelentkeznek.

A napkitörések nagyenergiájú robbanások a Nap felületén. Olyan területek ezek, amelyek sokkalta forróbbak, mint az őket körülvevő, nem villódzó részek. Egyetlen, a napfelszínnek mindössze ezredrézsére kiterjedő „fler” több nagyenergiájú sugárzást (ultraibolya fényt, röntgensugárzást, sőt gammasugarakat) bocsát ki, mint egyébként a Nap teljes felülete.

Bár a protuberanciák látványosak és néha napokig tartanak, ezek révén a Nap mégis nagyon kevés anyagot veszít. A „fler”-ekkel viszont más a helyzet. Jóval nehezebb észrevenni őket, és sokuk csak néhány percig tart; még a legnagyobbak is teljesen eltűnnek pár órán belül. Viszont akkora energiával rendelkeznek, hogy anyagot tudnak kilövellni az űrbe – anyagot, amely így örökre elvész a Nap számára.

Ennek megértése felé *Samuel Heinrich Schwabe* (1789-1875) német csillagász tette meg az első lépést, aki tizenhét éven keresztül szinte napról napra vizsgálta a Napot. 1843-ban rájött, hogy a Nap felszínén a foltok száma körülbelül tizenegy éves ciklusokban növekszik, illetve csökken. 1852-ben *Edward Sabine* (1788-1883) brit fizikus azt figyelte meg, hogy a Föld mágneses terének zavarai (a „mágneses viharok”) a napfolt-ciklussal párhuzamosan szaporodnak és csökkennek.

Ez eleinte csupán egy statisztikus állítás volt, mivel senki sem tudta, miféle kapcsolat lehet a két jelenség között. Idővel azonban, ahogy fény derült a napkitörések energetikai jellemzőire, az összefüggés is látható lett. Két nappal egy, a napkorong közepe táján (tehát közvetlenül a Földdel szemben) történt heves napkitörés után a Földön az iránytűk teljesen megzavarodtak, és látványos sarki fény tűnt föl.

Fontos a két nap késés. Ha a földi hatásokat a Napból jövő sugárzás okozná, akkor a „fler” és hatásai között nyolcperces időköz lenne, hiszen a Napból a sugárzás a fény sebességével halad a Föld felé. A kétnapos késés viszont azt jelenti, hogy bármi váltja is ki

ezeket a hatásokat, annak mintegy 900 kilométer/másodperces sebességgel kell terjednie. Ez is gyors, de a fénysebességnek a nyomába sem ér. Ilyen sebesség az atomnál kisebb méretű (latinosan: szubatomi) részecskék esetében várható; és ha yalamilyen, a Napban végbemenő történés ilyen, elektromos töltéssel rendelkező részecskéket zúdít ránk, akkor azok a Földre érve úgy hatnak az iránytűre és a sarki fényre, ahogyan azt megfigyelték.

Amint a Nap által kibocsátott szubatomi részecskéket fölfedezték, a Nap más tulajdonságait is kezdték jobban megérteni.

Ha a Hold teljesen eltakartja a Napot, szabad szemmel gyöngyházfényű ragyogás látható a helye körül, középpontjában az átlátszatlan, fekete holdkoronggal. Ez a *napkorona*, amely dicsfényként övezi a Napot.

Ugyanannak az 1842-es napfogyatkozásnak a során, amely a protuberanciák tudományos tanulmányozásának is elindítója volt, vizsgálták meg először figyelmesen a koronát. Erről is úgy találták, hogy a Naphoz, nem pedig a Holdhoz tartozik. 1860-ban kezdték fölhasználni a korona kutatásában a fényképezést, majd pedig ugyanezen célra színeképelemzést is alkalmaztak.

1870-ben egy spanyolországi napfogyatkozás alatt vizsgálta meg először *Charles Augustus Young* (1834-1908) amerikai csillagász a korona színeképét. A spektrumban talált egy fényes, zöld vonalat, amely egyetlen ismert elem egyetlen ismert vonalával sem egyezett meg. Más, furcsa vonalakat is talált, és ő volt az, aki - mint erre futólag már utaltam - föltételezte, hogy egy ismeretlen elem rejlik mögöttük, amelyet „koroniumnak” nevezett el.

A „koroniummal” (azonkívül, hogy színeképvonalainak létezését följegyezték) mindaddig nem sokat lehetett kezdeni, amíg meg nem fejtették az atomszerkezet természetét. Minden atom középpontjában egy-egy nagyobb tömegű mag van, amelyet a külső övezet egy vagy több, kisebb tömegű elektronja vesz körül. Az atomnak, valahányszor eltávolítunk belőle egy elektront, megváltoznak a színeképvonalai. Olyan atomok színeképét ugyan tudták vizsgálni a kémikusok, amelyekből néhány elektront eltávolítottak, olyan technika viszont, amellyel nagyszámú elektront lehet eltávolítani az atomból, és amellyel aztán ilyen körülmények között tanulmányozni lehet a színeképet, eleinte nem állt rendelkezésre.

1941-ben azután Bengt Edlén ki tudta mutatni, hogy az állítólagos „koronium” egyáltalán nem egy új elem. Közönséges elemek, mint a vas, a nikkél és a kalcium, amikor megfosztották őket vagy egy tucat elektrontól, ugyanolyan vonalakat produkáltak, mint a „koronium”. A „koronium” mögött tehát közönséges elemek bújtak meg, többszörösen elektronhiányos állapotban.

Ilyen többszörös hiány csak nagyon magas hőmérsékleten alakulhat ki, ezért Edlén úgy gondolta, hogy a napkoronának egy-két millió fokosnak kell lennie. Ezt először csaknem általános hitetlenkedés fogadta, ám végül, amikor beköszöntött a rakéatechnika

kora, azt találták, hogy a korona röntgensugarakat bocsát ki - márpedig ez csak úgy lehetséges, ha hőmérséklete az Edlén által becsült érték körül van.

A korona ezek szerint a Nap külső légköre, amelyet folyamatosan táplál a kitörések által fölrepített és kidobott anyag. Ez a korona nagyon ritka, köbcéntiméterenként egymilliárdnál kevesebb részecskét tartalmaz, így az átlagos sűrűsége nem sokkal nagyobb, mint a földi légkör tengerszinten mért sűrűségének egybilliomod része. Valójában ez egy rendkívül jó vákuum.

Az az energia tehát, amelyet a napkitörések, a mágneses mezők, illetve az örökkön hömpölygő konvekciós áramlás kiváltotta roppant hangrezgések dobnak föl a Nap felszínéről, aránylag kevés részecske között oszlik meg. Bár a korona teljes hőtartalma óriási térfogatához képest nem nagy, a kisszámú részecske mindegyikébe nagyon sok hő zsúfolódik - márpedig ez az „egy részecskére eső hő” az, amit mint hőmérsékletet mérünk.

A koronában levő részecskék a Nap felszínéről kilövellt különálló atomok, amelyek a magas hőmérsékleten mindegyik vagy legalábbis legtöbb elektronjukat elveszítették. Mivel a Nap jobbára hidrogénből áll, a részecskék legtöbbször hidrogénmag, vagyis proton. Mennyiségüket tekintve a hidrogén után a héliummagok következnek. Az összes többi, nehezebb atommag nagyon kis számban fordul elő. Még ha egyes nehéz magoknak szerepük is van a megfigyelhető „koronium”-vonalak létrejöttében, azok csak nyomokban lehetnek jelen.

A koronában a részecskék a Naptól minden irányban távolodva mozognak. Ahogy kifelé tartanak, a korona mind nagyobb és nagyobb térfogatot foglal el, ugyanakkor egyre ritkább és ritkább lesz. Így természetesen egyre gyöngébben és gyöngébben világít, míg egyszer aztán a Naptól bizonyos távolságra már nem is észlelhető tovább.

Az azonban, hogy a korona fokozatosan a megfigyelhetlenségig halványodik, nem zárja ki, hogy kifelé száguldó részecskék formájában továbbra is létezzék. *Eugene Newman Parker* (1927-) amerikai fizikus 1959-ben a *napszél* nevet adta ezeknek a száguldó részecskéknek.

A napszél túlterjed a belső bolygókon. Az űrszondák tanúsága szerint a Szaturnusz bolygó pályáján kívül is észlelhető, sőt nagyon lehet, hogy a Neptunusz, illetve a Plutó pályáján túl is észlelhető marad. Más szóval, a körülötte levő valamennyi bolygó a Nap óriási légkörén belül mozog. Igaz, ez a légkör olyan ritka, hogy a bolygómozgást semmilyen észrevehető módon sem befolyásolja.

Annyira azonban nem ritka, hogy másfajta figyelemre méltó hatásokat ne tudna kifejteni. A napszél részecskéi elektromos töltéssel rendelkeznek; ezek a részecskék alkotják a Föld mágneses terének csapdájába esve a „Van Allen-öveket”, ezek hozzák létre a sarki fényt, s befolyásolják a földi iránytűket, valamint az elektronikus

eszközöket. A napkitörések ideiglenesen fölerősítik a napszelet, s ilyenkor egy időre ezek a hatások is nagymértékben fölfokozódnak.

A Föld környékén a napszél részecskéi 400-700 kilométer/másodperces sebességgel száguldanak, a részecskék száma pedig köbcéntiméterenként egy és nyolcvan között mozog. Ha ezek becsapódnának a földfelszínre, a lehető legkárosabb hatással lennének az életre, a Föld mágneses tere és légköre azonban megóv bennünket ettől.

A Napból a napszállal másodpercenként egymilliárd kilogrammnyi anyag szökik meg. Emberi mértékkel mérve ez hatalmas mennyiség, a Nap szempontjából azonban elenyésző. A Nap csaknem ötmilliárd éve van már a fősorozaton, és még öt-hatmilliárd évig ott is marad. Ha eközben mindvégig a jelenlegi ütemben veszít a tömegéből a napszél révén, akkor a fősorozaton való teljes tartózkodása alatt a tömegének mindössze úgy ötezred része megy veszendőbe.

Persze, egy jókora csillag tömegének az ötezred része sem akármilyen növekedést jelent a roppant csillagközi űrben sodródó anyagmennyiség szempontjából. Ez az első példa arra, hogyan szökhet ki anyag a csillagokból és hogyan növekedhet a csillagközi gáz mennyisége.

A Nap ebben a tekintetben is teljesen átlagos. Minden okunk megvan azt hinni, hogy valamennyi, még össze nem roppant csillagból távozik ilyen *csillagszél*.

A többi csillagot nyilvánvalóan nem tudjuk ugyanúgy megvizsgálni, mint a Napot, de ezekből is kapunk jelzéseket. A kicsiny, hideg *vörös törpék* fényessége például szabálytalan időközönként hirtelen megnő, s eközben a színük is fehérebbé válik. A kifényesedés időtartama néhány perc és egy óra között változik, és minden olyan tulajdonsággal rendelkezik, ami egy kisméretű csillag felszínén levő „fler”-től elvárható. Ezeket a vörös törpéket ezért *fleres csillagoknak* hívják.

Egy „fler”, amely nem nagyobb a mi Napunkon szokásosnál, sokkalta jelentősebb hatást kelt egy kisebb csillagon. Az a „fler”, amely a Nap fényét csupán 1 százalékkal képes fokozni, egy halvány csillag fényének esetében 250 százalékos fényerő-növekedéshez is elegendő lehet.

Ha viszont így van, akkor egy vörös törpe igen komoly csillagszelet képes kelteni.

Egyes csillagok szokatlanul erős csillagszállal rendelkeznek. A vörös óriások hatalmas kiterjedésűek, a legnagyobbak átmérője körülbelül 500-szor akkora, mint a Napé. Ez azt jelenti, hogy felszíni gravitációjuk aránylag kicsi, hiszen azt, hogy egy terjedelmes vörös óriásnak nagyobb a tömege, kiegyenlíti az, hogy felszíne rendkívül távol van a középponttól.

A vörös óriások ugyanakkor közel állnak ahhoz, hogy megszűnjenek kiterjedt csillagokként létezni: nemsoká összeroppannak. Ezért ritkamód nyugtalanok. Föltehetően nagy erők kényszerítik kifelé az anyagot a viszonylag gyöngye felszíni gravitáció ellenében.

A Betelgeuze, ez a hatalmas vörös óriás elég közel van hozzánk ahhoz, hogy a csillagszél részletesebb adatokat gyűjthessenek róla. Csillagszélét például milliárdszor akkorára becsülik, mint amilyen a Napé. Es bár a Betelgeuze tömege a Napénak tizenhatszorosa, ilyen ütemű kiáramlás mellett durván egymillió év alatt teljesen elfogyna – hacsak már jóval előbb össze nem roppan.

Föltételezhető, hogy saját égi világítótestünk napszele nem marad el túlságosan a csillagszelek általában szokásos erősségétől. Ha föltesszük, hogy Galaktikánkban a csillagok száma úgy 300 milliárd körül jár, akkor a csillagszelek által megszöktetett teljes tömeg mintegy 300 milliárdszor milliárd ($3 \cdot 10^{20}$) kilogramm lehet másodpercenként.

Ez azt jelenti, hogy 200 évenként szökik ki a Nap tömegével egyenlő anyagmennyiség a csillagokból a csillagközi térbe. Ha elfogadjuk, hogy Galaktikánk tizenötmilliárd éves, és hogy a csillagszelek mindvégig változatlan iramban tették a magukét, az űrbe kiszökött összes csillaganyag körülbelül hetvenötmillió Nap-méretű csillag tömegének, vagyis a Galaktika tömege 27^{00} -ad részének felel meg.

Csakhogy ez a szél a csillagok felszíni rétegeiből fúj, márpedig azok teljesen vagy csaknem teljesen hidrogénből és héliumból állnak. Ezért a csillagszél is teljesen vagy csaknem teljesen hidrogén- és héliummagokból áll, és nem járul hozzá nehéz magokkal a galaktikus keverékhez. A csillagok belsejében létrejövő nehéz atommagok ott is maradnak, nem zavartatva magukat a távoli felszínen kialakuló csillagszálltól.

Ha egy csillag (mint a mi Napunk is) szerkezetének felső rétegeiben, jóval kívül a legbelső övezeten nyomokban nehéz magokat is tartalmaz, akkor ilyen nyomok természetesen a csillagszállban is elő fognak fordulni. Ezek a nehéz magok viszont nem a szóban forgó csillag belsejében alakultak ki, hanem már annak létrejöttékor is jelen voltak. Valamilyen külső forrásból származnak – s ez a forrás az, amit keresünk.

SZÖKÉS KATASZTRÓFÁVAL

Ha a nehéz magok nem a csillagszél mechanizmusa révén jutnak a csillagok belsejéből a külső térbe, akkor olyan, hevesebb események után kell néznünk, amelyek azt követően játszódhatnak le, hogy a csillag elhagyta a fősorozatot.

A csillagok többségét egyből kizárhatjuk, 75-80 százalékuuk ugyanis lényegesen kisebb, mint a Nap. Úgy 20-tól 200 milliárd évig terjedő időt töltenek a fősorozaton attól függően, hogy mennyire kicsik. Ez azt jelenti: a létező kis csillagok közül még egy sem hagyta el a fősorozatot. Az eltelt idő még a legöregebbek számára (azok számára, amelyek a világegyetem legkorábbi időszakában, a „big

bang" utáni első milliárd évben keletkeztek) sem volt elég hidrogén-üzemanyaguk olyan mérvű elfogyasztásához, hogy el kelljen hagyniuk a fősorozatot.

Sőt, ha egy kisméretű csillag hagyja el a fősorozatot, az minden különösebb hűhó nélkül megy végbe. Amennyire ez megállapítható: minél kisebb a csillag, annál kisebb hévvel játszódnak le a fősorozat elhagyása utáni események. A kis csillagok is (ahogy végtére minden egyes csillagnak muszáj) vörös óriássá tágulnak, de az ő esetükben a tágulás viszonylag kisméretű vörös óriást eredményez. Az efféle vörös óriás valószínűleg sokkal tovább marad fenn, mint a látványosabb fajta, végül pedig többé-kevésbé nyugodtan roppan össze fehér törpévé, ez pedig kisebb sűrűségű lesz, mint a Szíriusz B és a hozzá hasonlók.

Azok a nehéz elemek (többnyire szén, nitrogén és oxigén), amelyek egy kisebb csillag belsejében keletkeznek, a csillag fősorozatbeli tartózkodása alatt a belső övezetben foglalnak helyet, s az összeroppanás után továbbra is a fehér törpe belsejében maradnak. Sohasem jutnak ki (legfőlegb nyomonban) a csillagközi gázba. Nagyon különleges eseteket kivéve az összes nehéz elem, amely egy kisméretű csillagban keletkezett, korlátlan ideig ott is marad ebben a csillagban.

A csillagok 10-20 százalékát teszik ki a Naphoz hasonló tömegűek. Ezek csak öt-tízmilliárd évet töltenek a fősorozaton, mielőtt fehér törpévé roppannának össze. A mi Napunk, amely körülbelül tízmilliárd évig marad a fősorozaton, még most is ott van, hiszen csak mintegy ötmilliárd éve keletkezett. A Naphoz hasonló, de annál öregebb csillagok mostanáig már elhagyhatták a fősorozatot, és a világegyetem csecsemőkorában születettek bizonyára mind meg is tették ezt.

A Nap nagyságrendjébe tartozó csillagokból nagyobb méretű vörös óriások jönnek létre, mint a kisebbekből, s ezek aztán, amikor elérkezik az ideje, jóval nagyobb hévvel roppannak össze fehér törpévé, mint a kisebbek. Az összeroppanás energiája a csillag legkülső rétegeit valószínűleg kirobbantja az űrbe, és egy planetáris ködöt hoz létre – olyat, amilyenekről könyvünkben korábban már említést tettünk.

Az a táguló gázhéj, amely egy Nap-szerű csillag összeroppanása révén jött létre, a csillag eredeti tömegének 10-20 százalékát is tartalmazhatja. Ez az anyag azonban a csillag külső részéből származik, s ez a külső rész egy efféle csillag esetében még az összeroppanás pillanatában is lényegében hidrogén-hélium keverékből áll.

Bár a csillag összeroppanásakor föllépő forrongás valamennyi nehéz magot a felszínre, majd a gázhéjjal az űrbe juttat, ez a mennyiség csupán a csillagközi gázfelhőkben levő nehéz magok mennyiségének kis hányadára ad magyarázatot.

De ha már a fehér törpék keletkezésénél tartunk: mi a helyzet azokban a különleges esetekben, amikor a fehér törpe sem jelent

végállomást; s hol szolgálhatnak mégis eszközül ahhoz, hogy anyag szóródjon szét az űrben?

Korábban már beszéltem azokról a fehér törpékről, amelyek egy-egy szoros kettős rendszerbe tartoznak, és így anyaghoz juthatnak vörös óriássá váló társcsillaguktól. Az anyag egy része ilyenkor mindig fúzióba lép a fehér törpe felszínén. A rengeteg fölszabaduló energia a fúzió termékeit kirobbantja az űrbe, s úgy fölfényesíti a csillagot, hogy a Földről nóvának fog látszani.

A fehér törpének átadott anyag azonban legnagyobb részét a táguló vörös óriás legkülső rétegeiből származó hidrogén és hélium. A fúzióban a hidrogén héliummá alakul át, s ami végül is kizúdul az űrbe, az nem egyéb egy héliumfelhőnél. Ebben az esetben is ha a fehér törpe kapott egyáltalán valamennyi, a héliumnál nehezebb magot a társcsillagtól, vagy ha a fúziós folyamatban jön létre ilyen, ez akkor is elenyésző a csillagközi gázfelhőkben levő nehéz magok mennyiségéhez képest.

Mi van még ezeken kívül? A nehéz magok számára egyetlen lehetséges forrás marad: a szupernóva.

Az I-es típusú szupernóva – mint korábban vázoltam – a közönséges nóvákhoz hasonlóan alakul ki. Egy fehér törpe anyagot vesz át közeli társától, amely éppen vörös óriássá van tágulóban. A különbség az, hogy itt a fehér törpe tömege közel jár a Chandrasekharhatárhoz, így aztán a kapott anyagmennyiség végül is túllendíti ezen a határon: a fehér törpének össze kell roppannia. Ezenközben igen erős fúzió indul be a belsejében, és fölrobban.

A csillag teljes, mintegy 1,4 naptömegnyi szerkezete szanaszét szaggatódik, és egy táguló gázfelhővé alakul át. Egy ideig szupernóvaként látjuk fényleni, de a sugárzás (bár egy darabig nagyon erős) végül is kihuny. A gázfelhő megmarad, évmilliókon át tágul, míg-csak bele nem olvad a mindenütt jelenlevő csillagközi gázba.

A fehér törpe robbanása óriási mennyiségű szenet, nitrogént, oxigént és neont (ezek a leggyakoribb nehéz elemek) szór ki az űrbe. A robbanás folyamán bizonyos fokú további fúzió megy végbe, így aztán kis mennyiségben olyan magok is keletkeznek, amelyek még a neonnál is nehezebbek.

Természetesen nagyon kevés fehér törpének van olyan nagy tömege és olyan közeli, nagyméretű társcsillaga, ami egy I-es típusú szupernóva létrejöttéhez szükséges, de a Galaktika tizennégy milliárd évet átívelő élettartama alatt elegendő ilyen robbanás volt ahhoz, hogy a csillagközi gázban található nehéz magok tekintélyes hányadát ennek tulajdoníthassuk.

A csillagközi gázban levő többi nehéz mag a H-es típusú szupernóvák számlájára írható. Ezek – mint már említettem – a Napnál tízszer-hússzor, vagy akár hatvanszor is nagyobb tömegű csillagok.

Mialatt vörös óriás állapotban vannak, ezeknek a roppant csillagoknak a belsejében a fúzió egészen odáig folytatódik, hogy jelentős mennyiségű vas-atommag jön létre. Ez az a végállomás, amelyen az

energiatermelő fúzió nem mehet túl. Ezért a csillag a vastermelés meghatározott pillanatában összeroppan.

Még ha egy ilyen csillag belsejében, az egyre mélyebben fekvő rétegekben található is nehéz magok, egészen a vasig, a külső rétegek óriási mennyiségű, egyelőre érintetlen hidrogént tartalmaznak, amelynek hőmérséklete és nyomása sohasem ért el olyan magas értéket, hogy fúzióra kényszerült volna.

Az óriáscsillagok összeroppanása olyan hirtelen következik be, hogy eközben mind a hőmérséklet, mind a nyomás katasztrofális gyorsasággal nő. Az összes hidrogén (nemkülönböztetve a hélium), amely addig aránylag eseménytelen életet élt, most fuzionál – méghozzá egy csapásra az egész. Az eredmény egy iszonyatos nukleáris robbanás, amelyet mi mint II-es típusú szupernóvát észlelünk.

A felszabaduló energia részben olyan magreakciókra fordítódik, amelyek a vasnál is nehezebb magokat termelnek. Ezek a folyamatok energiaigényesek, de a szupernóva tombolásának tetőfokán a szükséges energia minden további nélkül rendelkezésre áll. És valóban, egészen az uránig, sőt még azon túl is keletkeznek magok. Ez az energia elég ahhoz, hogy radioaktív (tehát nem stabilis) magok keletkezzenek, amelyek aztán majd el fognak bomlani. Valójában a világegyetemben ma létező valamennyi nehéz mag II-es típusú szupernóva-robbanások révén jött létre.

Biztos, hogy a II-es típusú szupernóva-robbanásra alkalmas nagytömegű csillagok nem túl gyakoriak. Talán milliónál is több csillag között fordul elő egyetlen olyan, amelynek elég nagy a tömege ehhez. A helyzet mégsem olyan reménytelen, mint amilyennek tűnik. Ez ugyanis még mindig annyit jelent, hogy Galaktikánkban tízezrével vannak potenciális II-es típusú szupernóvák.

Mivel az ilyen óriáscsillagok legfőljebb néhány millió évig maradhatnak a fősorozaton, csodálkozunk kellene, hogy miért nem ért az út végére, s miért nem robbant föl mindegyikük már réges-régen. A válasz erre az, hogy állandóan újabb csillagok keletkeznek, és ezek némelyike nagyon nagy tömegű. A mostanában látható II-es típusú szupernóvák a mindössze pár millió évvel ezelőtt keletkezett csillagok robbanásai. Azok a II-es típusú szupernóvák pedig, amelyek majd a távoli jövőben lesznek láthatók, ma még nem is létező nagyméretű csillagok robbanásai lesznek.

Ennél drámaibb szupernóvák is lehetségesek. Nem is olyan régen a csillagászok még szinte biztosra vették: olyan csillagok létezésének, amelyek tömege nagyobb a Nap hatvanszorosánál, egyáltalán nincs valószínűsége. Úgy gondolták, az ennél nagyobb tömegű csillagok belsejében annyi hő fejlődne, ami dacára a hatalmas gravitációnak azonnal fölrobbantaná őket. Ez azt jelentette, hogy ilyenek egyáltalán létre sem jöhetnek.

Az 1980-as években azonban kiderült, hogy ez az okfejtés nem vette figyelembe Einstein általános relativitáselméletének bizonyos vonatkozásait. Amint ezeket a vonatkozásokat is bevezették a csilla-

gászati számításokba, kiderült, hogy a csillagok a Nap átmérőjének százszorosáig, illetve tömegének kétezerszereséig is meglehetősen stabilak maradnak. Mi több, egyes csillagászati megfigyelések azt mutatják, hogy ilyen szuper-nagytömegű csillagok valóban léteznek is.

Természetesen végül a szuper-nagytömegű csillagoknak is össze kell roppanniuk és olyan szupernóvaként kell fölrobbanniuk, amely a közönséges szupernóvákhoz képest sokkal hosszabb időn át sokkal több energiát termel. Ezek a szuper-robbanások lehetnének a III-as típusú szupernóvák.

V. P. Urrobin szovjet csillagász visszamenőleg megnézte, vajon található-e a csillagászati följegyzésekben olyan szupernóva, amely jellegét tekintve III-as típusúnak látszik. Ugy vélte, hogy egy, a Perzeusz csillagkép egyik galaxisában 1961-ben észlelt szupernóva pontosan ilyen. Nem napok vagy hetek alatt érte el a csúcspontját, hanem egy teljes évig tartott, amíg elérkezett a tetőpontra, azután pedig nagyon lassan halványult el, még kilenc évvel később is látható volt. Összesen tízszer annyi energiát termelt, mint egy közönséges szupernóva. A csillagászokat már akkoriban is zavarba ejtette szokatlan voltával.

Az ilyen szuper-nagytömegű csillagok rendkívül ritkák, viszont jó ezerszer vagy még többször akkora mennyiségben termelnek nehéz magokat, mint a közönséges szupernóvák. Ez azt jelenti, hogy komoly mértékben kell hozzájárulniuk a csillagközi gázfelhők nehézmag-készletéhez.

Létrejötté óta mintegy 300 millió különböző fajta szupernóva robbanhatott föl a Galaktikában (és hasonló mennyiségű – a méretbeli különbségekből adódó eltérésekkel, persze – az összes többi galaxisban is), márpedig ez elegendő ahhoz, hogy magyarázattal szolgáljon a nehéz magok mennyiségére mind a csillagközi gázban, mind a közönséges csillagok legkülső rétegeiben, mind a különféle bolygóknak (a Naprendszerünkön kívül esetleg létezőket is beleszámítva).

Láthatjuk tehát: jóformán az egész Föld és mi magunk is csaknem teljes egészében olyan atomokból állunk, amelyek nem saját Napunkban, hanem más csillagokban keletkeztek, és korábbi szupernóva-robbanások révén szóródtak szét az egész világűrben. Az egyes atomokról nem lehet megmondani, hogy melyik csillagból származnak, vagy hogy pontosan mikor robbantak ki az űrbe, de annyit tudunk, hogy valamelyik távoli csillagban keletkeztek, és valamikor a távoli múltban végbement robbanás révén jutottak el hozzánk.

Világunkat és bennünket magunkat tehát nem egyszerűen a csillagok, hanem kifejezetten a robbanó csillagok hozták a világra. A szupernóvák szülöttei vagyunk.

A csillagok és bolygók

ELSŐ GENERÁCIÓS CSILLAGOK

A világegyetem léte nagyjából tizenötmilliárd évvel ezelőtt, a „big bang”-gel vette kezdetét – méghozzá egy elképzelhetetlenül magas hőmérsékletű, ugyanakkor hihetetlenül apró szerkezet formájában.

Ez aztán rendkívüli hirtelenséggel tágulni és hűlni kezdett. Kezdetben sugárzásból (fotonokból) és kvarkokból, valamint elektronokból és neutrínókból állt, ezeket azonban hamar követték az olyan szubatomi részecskék, mint a protonok és a neutronok, amelyek már nagyobb tömeggel rendelkeznek. Ahogy a világegyetem tovább tágult és hűlt, a protonokból és a neutronokból olyan atommagok képződtek, mint a hidrogén-2, a hélium-3 és a hélium-4, de ezen túl aztán egy lépéssel sem ment a dolog. A folyamat pár perc leforgása alatt véget is ért, s a világegyetem óriási hidrogén- és héliummag-készlete készen állott.

További, talán 700 000 évig tartó tágulás és hűlés eredményeként csökkent le annyira a hőmérséklet, hogy a negatív töltésű elektronok a pozitív protonok, illetve az összetettebb magok közelébe férközhettek, ahol aztán az elektromágneses erők a helyükhöz szögezték őket.

Ily módon hidrogén- és héliumatomok jöttek létre. A héliumatomok, bármi történések is, mindig önállóak maradnak, de ha két hidrogénatom ütközik össze elég alacsony hőmérsékleten, akkor azok egy kétatomos alakzattá, hidrogénmolekulává kapcsolódnak össze.

Ahogy a világegyetem tovább tágult és hűlt, úgy tágult vele együtt minden irányban a hidrogén és a hélium. Föltételezhetjük ezért, hogy az univerzum egy homogén felhő volt, amely ezeknek a gázoknak a keverékéből állt, s amely mindenütt folyamatosan ritkult, hiszen egyre nagyobb és nagyobb térfogatot kellett kitöltenie.

Bizonyos okoknál fogva azonban a felhő nem maradt egyenletes sűrűségű, más (görög eredetű) szóval: nem maradt *homogén*. Talán véletlen ingadozások és a nyomukban járó örvénylések okozták, hogy az atomok ide-oda sodródva az átlagosnál nagyobb sűrűségű,

lassan forgó tartományokat képeztek, amelyek különváltak az átlagosnál kisebb sűrűségű tartományoktól.

Ha az atomok tovább folytatják rendezetlen mozgásukat, akkor ezek a különbségek végül is eltűnnek. A nagyobb sűrűségű részekből atomok mennek át a kisebb sűrűségűekbe, vagyis érvényesül a homogenitás visszaállítására irányuló tendencia. Persze, a véletlenszerű mozgások és örvénylések újra létrehozhatnak nagyobb sűrűségű tartományokat, de ezek helye (akárcsak a kisebb és nagyobb nyomású övezeteké a földi légkörben) állandóan változik.

Ha azonban egy nagy sűrűségű régió alakul ki, akkor az állandónak bizonyulhat. Az ilyenekben a gravitációs tér erőssége a sűrűséggel párhuzamosan nő. A gravitációs tér egyszer csak erősebbé válik, mint a rendezetlenül mozgó atomok szétszóródási tendenciája. Sőt, a nagyobb sűrűségű tartomány gravitációs tere arra is elég erős lehet, hogy befogja a kisebb sűrűségű régiók atomjait, és így a sűrűbb részek még sűrűbbé, a kevésbé sűrűek pedig még kisebb sűrűségűekké válnak.

Röviden: a homogén hidrogén-hélium keverék egy idő múlva hatalmas felhőkké tömörül, amelyeket szinte légüres tér választ el egymástól.

Egy-egy hatalmas gázfelhőnek a tömege és a térfogata fölér egy galaxiséval, sőt akár egy galaxishalmazéval is. Az ilyeneket *protogalaxisoknak* nevezhetjük. A protogalaxisokon belül az -atomok rendezetlen mozgása további egyenlenségeket idéz elő. A végén a protogalaxisok már kisebb gázfelhők milliárdjaiból állnak, amelyeket gyakorlatilag üres tér választ el egymástól. A kisebb felhők ugyanúgy forognak bennük, mint ahogy a protogalaxisok is forognak egymáshoz képest. (Érdekes módon ezek a forgások különböző irányúak, és ha összegezzük őket, akkor a különböző irányok kiegyenlítik egymást, az univerzum mint egész tehát nem forog.)

Minden gázfelhőnek megvan a saját gravitációs tere. Amelyik elég sűrű, annak a gravitációs tere is elég erős lesz ahhoz, hogy elkezdje összehúzni a felhőt.

Ha pedig az összehúzódás beindult, akkor a felhő sűrűsége tovább nő, s ennek következtében a gravitációs térereje is nőni fog. Az erősödő gravitációs tér viszont szükségszerűen fokozza az összehúzódást. Más szóval, ha egyszer egy gázfelhő elkezd összehúzódni, akkor ennek az összehúzódásnak mind gyorsabbá és gyorsabbá kell válnia.

Ahogy a felhő összefelé húzódik, a nyomás és a hőmérséklet a közepén folyton növekszik, s egyszer csak elég nagy lesz ahhoz, hogy beindulhasson a magfúzió. A felhő hamarosan annyira forró lesz, hogy fényt képes kibocsátani: többé már nem gázfelhő, most már csillag lett belőle.

A csillagkeletkezés minden protogalaxisban lejátszódott, úgyhogy mire a világegyetem egymilliárd éves lett, a protogalaxisok gázfelhői

ragyogó csillagokkal teli galaxisokká alakultak át. Ezek közül való a mi Galaktikánk is.

Keletkezésük idején a galaxisok kizárólag hidrogént és héliumot (főleg hidrogént) tartalmaztak. A létrejövő csillagok is tisztán hidrogénből és héliumból álló, úgynevezett első generációs csillagok voltak.

Ha úgy képzeljük el a dolgot, hogy az összes gázfelhő ilyen első generációs csillagokká sűrűsödött, akkor az a látszat keletkezik, mintha ez a folyamat egyszer s mindenkorra véget ért volna. Az első generációs csillagok viszonylag kicsik és nyugodtak, könnyen ottmaradhatnak akár tizennégy milliárd évig is a fősorozaton, így aztán még ma is vígan léteznek. Ha némelyikük fehér törpévé roppan is össze, az aránylag csöndben zajlik le.

Egyes galaxisokban valóban nagyon kevés gáz- és porfelhő van, és gyakorlatilag minden csillaguk első generációs. Ezekben protogalaxis-korukban a gázfelhők eloszlása bizonyára eléggé egyenletes volt, maguk a felhők pedig méretüket tekintve viszonylag egyformák lehettek.

MÁSODIK GENERÁCIÓS CSILLAGOK

Más galaxisokban azonban (és a miénk is ezek közé tartozik) a gázfelhők valamilyen okból különböző méretűek lehettek. A nagyobb felhőknek nyilván a többinél gyorsabban kellett sűrűsödniük, hiszen gravitációs terük erősebb volt. Föltehetőleg ezekből a nagyobb felhőkből keletkeztek azok a nagytömegű csillagok, amelyek rövid életűeknek bizonyultak és fölrobbantak mint szupernóvák.

Valószínű, hogy a szupernóvák a hosszú-hosszú csillagászati időskálának szinte a legkezdetén megjelentek, és már akkor is anyagot robbantottak ki az űrbe, amikor sok gázfelhőnek még csillaggá sűrűsödni sem volt ideje.

A nagyenergiájú szupernóva-anyag fölmelegíti azokat a gázfelhőket, amelyekkel elkeveredik. Minél forróbb a felhő, az őt alkotó atomok annál gyorsabban végzik rendezetlen mozgásukat, s annál erősebben igyekeznek szétszóródni. A hűlőfélben levő felhő, amely önnön gravitációs vonzása folytán épp kezd összehúzódni, e fűtés hatására tágulni fog. Gravitációs tere gyöngébb lesz, a sűrűsödési periódus kezdete pedig időben jelentősen kitolódik, vagy akár el is marad.

Ezeknek a korai szupernóváknek tehát kettős funkciójuk van. Egyrészt fönntartják a gázfelhőket azáltal, hogy besűrűsödésüket megakadályozzák; ezért aztán sok galaxis még ma is gazdag ilyen felhőkben. Másrészt a héliumnál nehezebb magokat juttatnak ezekbe a felhőkbe. Ezek a nehéz magok egymással vagy a hidrogénnel egyesülve porrézecsskéket alkotnak, tehát a felhők gázt is és port is fognak tartalmazni.

Ez az oka, hogy míg egyes mai galaxisokban az össztömegnek kevesebb mint 2 százalékát alkotják a csillagközi gázfelhők, addig azokban, ahol a szupernóvák kitettek magukért, a gáz- és porfelhők aránya akár a 25 százalékot is elérheti.

A felhőkben gazdag galaxisokban a felhők nem egyenletesen oszlanak el. Ezek általában spirális galaxisok, a gáz- és porfelhők pedig főleg a spirálkarokban összpontosulnak. A mi Napunkat magában foglaló galaxissal is ez a helyzet: egyes becslések szerint Galaktikánk spirálkarjainak fele tömegét a csillagközi gáz- és porfelhők adják.

Ennyire poros a Galaktikánk az a külvárosa, amelyben élünk –ezért van az, hogy alig látunk bele a szerkezetébe. A Tejút síkjában, ahol a felhők összpontosulnak, a közelebbi csillagokon túl semmit sem látunk, mert a felhők minden egyebet eltakarnak. Közönséges fényben a Galaktika közepét sem látjuk, hogy a központon túli részekről már ne is beszéljünk.

Ezekről az övezetekről csak azért tudunk bármit is, mert megtanultuk fölhasználni a rádióhullámokat, amelyek könnyedén áthatolnak a felhőkön, és mert a Galaktika rendkívül aktív központi zónája bőségesen bocsát ki rádióhullámokat.

A Galaktikánkban ma létező csillagközi felhők tizennégy milliárd év óta vannak kitéve a milliányi szupernóva-robbanás hatásának, így aztán nem csoda, hogy jócskán fölkaarodtak és földúsultak. Ezekben a nagy felhőkben az atomok körülbelül 1 százaléka (vagyis a tömeg 3 százaléka) nehezebb a héliumnál, márpedig ezek csakis egy hihetetlen erejű szupernóva-robbanás által a csillagközi űrbe zúdított nehézatomos törmelékhalmból kerülhettek ide.

Időnként egy-egy ilyen, nehéz atomokban földúsult por- és gázfelhő a mi galaxisunkban vagy valamilyik másiban elkezd összehúzódni és egy vagy több csillagot, esetleg egy egész csillaghalmbot eredményez. A csillagközi felhőkből kialakuló jelentős mennyiségű nehéz atomot tartalmazó csillagokat nevezzük második generációs csillagoknak; ezek kicsiny, de azért nem elhanyagolható mértékben tartalmaznak olyan anyagokat, amelyek korábbi, most már halott vagy legalábbis nem fősorozatbeli csillagok kohójában készültek.

A Nap második generációs csillagként keletkezett 4,6 milliárd évvel ezelőtt, amikor a Galaktika már vagy tízmilliárd éve létezett. A felhő, amelyből kialakult, ilyen elképzelhetetlenül sokáig volt a szupernóva-robbanásokból jövő törmelékek hatásának kitéve, így a Nap (bár csaknem teljesen hidrogén és hélium alkotja) létrejöttének pillanatától fogva tartalmaz nehéz atommagokat, méghozzá nem is elhanyagolható mennyiségben.

Ha egy csillag, például a Nap, létrejöhetett tizmilliárd évvel az Srobbanás után, akkor azóta is keletkezhetnek csillagok. (Ez kétségtelenül így is van, mert hiszen ma is léteznek olyan fősorozatbeli csillagok, amelyek nagy tömegük miatt csak néhány millió éve alakulhattak ki.) Sőt, még olyanoknak is kell lenniük, akár a mi Galaktikánkban, akár a közvetlen környezetében, amelyek épp most van-

nak keletkezében, úgyhogy remélhetőleg közvetlen bizonyítékot is találunk majd az ilyen folyamatokra.

Mi a helyzet például az Orion-köddel? Ennek a por- és gázfelhőnek háromszázszor akkora a tömege, mint a Napé, és vannak benne csillagok, különben nem sugározna. A csillagokat a körülöttük levő gáz és por elfedi, éppen úgy, ahogy egy homályos üvegű villanykörte is a benne levő izzószáltól világít, de magát a szálát elrejtí a szemünk elől. Mégis, bizonyos jelek arra utalnak, hogy ezek a csillagok igen nagy tömegűek, akkor pedig fiataloknak kell lenniük. Egészen biztos, hogy a felhőből keletkeztek, és hogy olyanok is vannak, amelyek épp most vannak ugyanúgy keletkezésben.

Ott, ahol ilyen csillagkeletkezési folyamat megy végbe, a felhő egy darabja összetömrül, sűrűbbé, kevésbé átlátszóvá válik. A ködbeli csillagoknak a fénye, amely a köd többi részén áthalad és megvilágítja azt, a sűrűbbé váló részekben nehezebben hatol át. Ezért az Orion-ködben a közénk és a benne lévő csillagok közé eső tartományokban kicsi, sötét és többé-kevésbé kör alakú területeknek kell lenniük.

Ilyen sötét foltokat mutatott ki az Orion-ködben *Bart Jan Bok* (1906-1983) holland-amerikai csillagász 1947-ben. Lehetséges (bár nem biztos), hogy ezek az úgynevezett Bok-ködök kialakulóban levő csillagok.

Fölvetődhet a kérdés: miért kezdenek el a csillagközi felhők csillagokká sűrűsödni, ha egyszer évmilliárdokig elváltak felhőként, összehúzódás nélkül? Talán az atomok és a por rendezetlen mozgása teremt ezekben a felhőkben valamiféle összesűrűsödést, ami megnöveli a gravitációs tér erősségét és beindítja a folyamatot – ez a helyzet azonban nem állhat elő túlságosan gyakran, különben a dolog már évmilliárdokkal ezelőtt végbement volna.

Ugyanakkor a részecskék rendezetlen mozgása fokozatosan szét is szórhatja a felhőt, úgyhogy az beleolvad a csillagközi űr majdnem légüres terébe. Végül is a csillagközi térben mindenütt találunk nagyon ritka, nagyon híg gázt és némi finom port. Ez részben olyan anyagból áll, amely sohasem vett részt csillagok vagy csillagközi felhők keletkezésében, részben viszont olyanból, amely felhőkből szóródott ki.

Hogy ilyen csillagközi anyag létezik, azt elsőként *Johannes Franz Hartmann* (1865-1936) német csillagász bizonyította be 1904-ben. Egy csillag színképét tanulmányozva úgy találta, hogy a spektrumvonalak eltolódtak. Ez várható is volt, hiszen a csillag távolodik tőlünk. Hartmann azonban azt is észrevette, hogy bizonyos vonalak, még hozzá a kalcium vonalai mégsem tolódtak el. A kalcium többé-kevésbé nyugalomban volt, tehát nem lehetett a csillagokban.

Mivel a csillag és miközöttünk semmi sincs, csak az „üres” tér, a kalciumnak ebben az űrben kell lennie, amely ezek szerint közel sem teljesen üres. A kalcium bizonyára rendkívül hígán van szétszórva, de miközben a csillagfény a sok-sok fényévnyi űrön át utazik felénk, időről időre egy-egy kalciumatomhoz ér, amely elnyeli a fény egy-

egy fotonját. Végül elég fotont nyel el ahhoz, hogy egy észrevehető sötét vonalat okozzon a szinképen.

Robert Julius Trumpler (1866-1956) svájci-amerikai csillagász 1930-ban kimutatta, hogy a csillagközi por (bár sűrűsége hihetetlenül kicsiny) elegendő ahhoz, hogy távoli objektumokat érzékelhetően elhalványítson.

Mindebből arra következtethetünk, hogy azok a csillagközi gázfelhők, amelyek évmilliárdokon át léteznek és megőrzik önmagukkal való azonosságukat (ilyen az is, amelyikből a mi Napunk keletkezett, és ilyenek a ma létező felhők is), kényes egyensúlyi állapotban vannak. Ahhoz sem nem elég sűrűek, sem nem elég hidegek, hogy az összetömörödés folyamata elkezdődjék, ahhoz viszont sem nem elég ritkák, sem nem elég meleg, hogy szétszoljanak a csillagközi gáz háttérében.

Ahhoz tehát, hogy az ilyen felhőkből csillag képződjék, szükség van valamire, ami (ha csak kismértékben és ideiglenesen is) képes fölbillenteni az egyensúlyt. Mi lehet az, ami „mehúzza a ravaszt”?

A csillagászok számos lehetőséget vettek fontolóra. Az Orion-ködben például a mostani nagy, forró, fiatal csillagok olyan erős csillagszelet keltenek, amihez képest a mi napszelünk csupán lágyan lengedező fuvallat. Ezek a csillagszelek, amint végigsöpörnek a környező ködön, a port és a gázt maguk előtt hajtják és sűrűbbé préselik össze. Ez viszont a ködnek azon a tájékán fölerősíti a gravitációs teret és beindítja a sűrűsödést, ami aztán még jobban összetömöríti a gázt és a port, még jobban fölerősíti a gravitációs teret, és így tovább. Előbb egy Bok-köd, végül pedig egy csillag alakul ki.

Csakhogy akkor hogyan keletkeztek azok a bizonyos forró, fiatal csillagok? S főképp hogyan jött létre az Orion-köd legelső csillaga, mielőtt még az összehúzódási folyamatot elindító erős csillagszelek fölléptek volna a ködben?

Több lehetőség is szóba jöhet.

A csillagközi felhők, akárcsak maguk a csillagok, mozgásban vannak, méltóságteljesen keringenek a galaxis központi része körül, amely a galaxis tömegének nagy részét tartalmazza. Előfordulhat, hogy a csillagközi köd mozgása során egy nagy tömegű, forró nap közelében halad el, s ennek a csillagszele adja az első nyomáshullámot a csillag keletkezéséhez.

Máskor viszont két csillagközi felhő találkozhat össze, és egy kicsit benyomhatják egymást, elindítva egy kicsi összetömörödést; vagy a kettő egyszerűen összeolvad és egy kis átfedési tartományt alkot, amelyben a sűrűség nagyobb lesz, mint külön-külön volt. Az átfedési tartományban fölerősödik a gravitációs tér, és kezdetét veszi a sűrűsödés.

Előfordulhat aztán az is, hogy a csillagközi köd egy, a környező csillagoktól rendkívül távol eső területen halad át, ahol hőmérséklete valamennyivel lecsökken. Az őt alkotó atomok és részecskék mozgá-

A BOLYGÓK KELETKEZÉSE

sa lelassul, ezért azok egymás felé zuhannak, így a felhő sűrűbbé válik, és beindul az összehúzódás.

„A ravasz meghúzásának” ezek a lehetőségei azonban annyira gyengék, hogy kétséges, egyáltalán lehetséges-e olyan mértékű csillagkeletkezés, mint amilyen a valóságban volt. Van esetleg hatékonyabb „startpisztoly” is?

Van bizony! Ha egy szupernóva egy csillagközi felhőhöz viszonylag közel robban föl, akkor a kidobott anyagmennyiség lökéshullám módjára rohan bele a felhőbe. Ez sokkal hevesebb esemény lesz, mint bármi, ami egy közönséges csillag közelében vagy két felhő egybeolvadásakor végbemegy: a felhő összenyomódása erősebb, a csillagkeletkezési folyamat beindulása biztosabb lesz.

A szupernóva-robbanás azonban – ahogy e fejezet egy korábbi helyén már említettem – föl is fűtheti a csillagközi felhőt, így éppenséggel akadályozója lehet a sűrűsödésnek – ez attól is függ, hogy mennyire közeli a szupernóva, milyen volt eredetileg a felhő sűrűsége, és így tovább. Bizonyos körülmények között a szupernóva fűtő hatása, máskor viszont az összenyomó hatása győzedelmeskedik; az utóbbi eset vezet a csillagképződéshez.

Ezek szerint lehetséges (határozott bizonyítékunk nincs rá, ezért tényleg csak lehetőségről beszélünk), hogy körülbelül 4,6 milliárd évvel ezelőtt egy szupernóva robbant föl, talán csak néhány fényévnire egy olyan csillagközi felhőtől, amely mindaddig tízmilliárd éven át egyensúlyban volt? A szupernóva hozta volna létre annak a folyamatnak az elkezdődéséhez szükséges összetömörödést, amelynek végeredménye a Nap keletkezése lett?

Ha ez így volt, akkor háromszoros segítségért tartozunk köszönettel a szupernóváknak.

Először is a szupernóvák voltak azok, amelyek hosszú-hosszú korszakokon keresztül megtöltötték az űrt nehéz elemekkel, amik másképp soha nem jöttek volna létre; ezek az elemek létfontosságúak világunk és önmagunk számára, nélkülük sosem léphettünk volna a színre (és talán az élet semmilyen más formája sem, sehol a világegyetemben).

Másodszor, a szupernóva robbanások energiája tartott vissza rengeteg csillagközi felhőt (köztük azt, amelyből történetesen a mi Napunk született) az idő előtti összesűrűsödéstől, így azok kellő mennyiségben kaphattak nehéz elemeket.

Harmadszor, egy közeli szupernóva-robbanás indította be az akkor már jelentős mennyiségű nehéz elemet tartalmazó csillagközi felhő összesűrűsödését, amiből aztán a Nap jött létre.

Látjuk, hogyan fejlődik ki az eredetileg szétszórt csillagközi felhő egyszerű összesűrűsödéséből egy csillag (vagy kettő, vagy akár egy egész halmaz). De hogyan lehet az, hogy egy magányos csillagot, például a Napot, végül is bolygók vesznek körül – olyan égitestek, amelyek túl kicsik ahhoz, hogy csillagokká váljanak?

Ennek magyarázatára kétfajta elmélet van forgalomban: az úgynevezett katasztrófaelméletek, illetve a fejlődéselméletek.

A *katasztrófaelméletekben* a csillagokat úgy tekintik, mint amelyek (egyedül vagy társ csillagokkal) egyszerűen csillagokként, bolygócsalád nélkül keletkeznek. Minden csillag végigélheti (többnyire végig is éli) életét a fősorozaton, azután vörös óriássá tágul, végül pedig összeroppan. Mindvégig bolygók nélkül maradhat tehát.

Egyes esetekben azonban élete folyamán erőszakos események is megesnek a csillaggal. Egy másik csillag közeledhet hozzá, amely aztán továbbhalad. A kettejük között föllépő hatalmas gravitációs vonzás mindkettőből anyagot szakíthat ki, és ebből az anyagból alakul ki a bolygócsalád (esetleg mindkét csillag körül). Más esetben egy kettős rendszer egyik csillaga szupernóva-robbanáson mehet keresztül, ami csak kicsiny törmelékeket hagy maga után. Ezeket a darabkákat a társ csillag befogja, és bolygók lesznek belőlük. A bolygók mindkét esetben (s ez másféle katasztrófák esetében is elképzelhető) fiatalabbak, esetleg sokkalta fiatalabbak, mint a csillag, amely körül keringenek.

Az efféle katasztrófák nagyon ritkák, és ha a bolygókeletkezés katasztrófaelméletei a helytállóak, akkor a bolygók igazán rendhagyó jelenségek: a Galaktikában csupán maroknyi lehet a mi Naprendszerünkhöz hasonló objektumokból.

A *fejlődéselméletek* szerint ugyanaz a folyamat alakítja ki a bolygókat is, amely a csillagokat hozta létre. Ezen elméletek szerint a bolygók ugyanolyan öregek, mint központi csillaguk; így például a mi Naprendszerünkben is a középpontban álló Naptól a legtávolabbi üstökösig valamennyi tag egykorú. Mi több, ezekből az elméletekből az is következik, hogy a legtöbb csillagnak (ha nem épp mindegyiknek) vannak bolygói.

Melyik a helytálló a kétféle elmélet közül?

Ezt nehéz megmondani. Tényleges megfigyelések alapján nem tudunk dönteni. Mindaddig egyetlen olyan csillagképződést sem tudtunk tanulmányozni, amely elég közel lenne ahhoz, hogy megmondhassuk: keletkeztek-e bolygók is, és ha igen, hogyan. Azt sem lehet végérvényesen eldönteni, hogy a bolygórendszerek vajon nagyon gyakoriak (ez a fejlődéses keletkezés mellett szólna) vagy nagyon ritkák (ez viszont a katasztrófa mellett). Mindkét elmélet típus mellett vagy ellen csak különböző elméleti megfontolásokkal érvelhetünk.

Ezekből az derül ki, hogy az 1940-es évek előtti formájukban mind

- a katasztrófaelméletek, mind a fejlődéseméletek komoly hiányosságokban szenvedtek. Olyannyira komoly hiányosságokban, hogy az elméleti csillagászoknak mindkettőt el is kellett vetniük. Majdhogynem azt mondhatjuk: mindennemű elmélet híján a Naprendszerrel kapcsolatos egyetlen ésszerű következtetés az volt, miszerint nem is létezik.

Az 1940-es években azonban a fejlődésemélet új változatai kiküszöbölték a legsúlyosabb hibákat, és elfogadható forgatókönyvet dolgoztak ki a Naprendszer kialakulására. Nézzük tehát a fejlődéses fölfogást, amelynek első változata – erről már volt szó – Kant és Laplace révén mint ködhipotézis vált ismertté az 1700-as évek közepén-végén!

A ködhipotézisben fontos szerep jut egy *impulzusmomentum* nevű mennyiségnek. A Nappá sűrűsödő csillagközi felhő kezdetben lassan forog, az impulzusmomentum pedig nem más, mint a forgásmennyiségnek a mértéke. Ez a mennyiség attól függ, hogy mekkora a forgás sebessége, és mekkora az objektum részeinek a forgástengelytől mért átlagos távolsága. Egy alapvető fizikai törvény szerint zárt rendszerben (amely semmiféle külső dologgal nincs kölcsönhatásban) az impulzusmomentum össz mennyisége állandó marad. Ahogy a csillagközi felhő összetömörödése folytatódik, részeinek a forgástengelytől való átlagos távolsága állandóan csökken. Ahhoz, hogy ez a csökkenés ellensúlyozódjék és a teljes impulzusmomentum értéke állandó maradjon, a forgási sebességnek növekednie kell.

Ahogy az egyre sűrűbbé váló felhő forgási sebessége nő, egyenlítője a centrifugális hatás következtében kidudorodik. A kezdeti, többé-kevésbé szabályos gömb alak helyett a felhő egyre inkább diszkosz alakúvá válik. Végül az egyenlítői kidudorodás elég nagy lesz ahhoz, hogy egy anyaggyűrű ki tudjon szakadni és le tudjon válni az egyenlítőről. Ez az anyaggyűrű tömörül aztán bolygóvá. A felhő nagysága tovább csökken, forgása pedig tovább gyorsul, egészen addig, amíg egy újabb anyaggyűrű le nem válik róla. Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg az összes bolygó ki nem alakult. Az anyaggyűrűk, miközben sűrűsödnek, maguk is egyre gyorsulva forognak, és róluk is kisebb gyűrűk hasadnak le – ezekből lesznek a holdak.

A ködhipotézis logikusan hangzott, és az 1800-as években sokáig népszerű is volt. Nehéz azonban belátni, miért tömörödik egy anyaggyűrű bolygóvá ahelyett, hogy kisbolygó-övezet keletkezne belőle, vagy éppenséggel szétszóródna az űrben. Ennél is súlyosabban esik a latba, hogy a Naprendszer teljes impulzusmomentumából 98 százalék jut a különféle bolygókra, maga a Nap pedig mindössze 2 százalékkal részesedik. A csillagászok nem tudták kitalálni, milyen módon kerülhetett az összes impulzusmomentum azokba a kis anyaggyűrűkbe, amelyek az összesűrűsödő felhőből szakadtak ki. A ködhipotézist ezért gyakorlatilag félretették, és a katasztrófaelméletek népszerűsége (megoldatlan problémáik ellenére) ötven évig nőttön-nőtt.

1944-ben azonban *Carl Friedrich von Weizsäcker* (1912–) német csillagász kidolgozta a ködhipotézis módosított változatát. Eszerint a köd nem simán, egyetlen testként, hanem áramlásszerűen, örvényeket alkotva forog. Ahogy a felhő sűrűsödik és egyre laposabbá válik, az örvények mind nagyobbak és nagyobbak lesznek, ugyanakkor egyre távolabb kerülnek a középponttól. Ahol a szomszédos örvények súrolják egymást, ott az egyikben levő anyag összeütközik a másikkal, s a különálló kis anyagdarabkák igyekeznek összenőni. A keveredés helyén a testek egyre nagyobbak lesznek, végül pedig létrejönnek a bolygók, mindegyik nagyjából kétszer olyan távol a Naptól, mint az előző.

Weizsäcker elmélete alapján könnyű lett megérteni a bolygók keletkezését, mivel kiküszöbölte a bolygóvá összeálló gázgyűrűk elképzelésének nehézségeit. De mi a helyzet a Naprendszer gyanús impulzusmomentum-eloszlásával? Weizsäcker elméletét gyorsan tovább finomították, figyelembe véve a Nap elektromágneses terét, illetve azt, hogy ez a tér milyen változáson megy át a sűrűsödés közben. Így aztán érthetővé vált, hogyan adja át az impulzusmomentumot a nagyméretű, központi Nap a Naprendszer periferiáján elhelyezkedő kis bolygóknak. A csillagászok biztosra veszik, hogy ezzel kezükbe került a bolygórendszerek keletkezésének kulcsa.

Miért tér el annyira az egyes bolygók mérete, és miért különböznek egyéb tulajdonságaik?

Ha a Nap tisztán első generációs csillag lenne, amely kizárólag hidrogénből és héliumból áll, akkor a bolygói is ugyanilyenek volnának. Ebben az esetben az egész felhő tiszta hidrogén-hélium elegy lett volna, ezért a bolygóknak is a Naphoz hasonló összetételűeknek kellene lenniük.

Sem a hélium, sem a hidrogén nem vegyül tovább (az előbbi egyedülálló atomokat, az utóbbi kétatomos molekulákat tartalmaz), és egészen alacsony hőmérsékleten -is gáz halmazállapotúak maradnak. Részecskéiket egyedül a gravitációs erők tarthatják együtt.

Képzeljünk magunk elé egy összesűrűsödő hidrogén-hélium felhőt! Állandó kötélhúzás folyik a gravitációs erő, illetve az egyes atomok és molekulák rendezetlen mozgása között: az előbbi együtt tartani, az utóbbi viszont kifelé szórni, szétszlatni igyekszik az anyagot. Minél nagyobb az összetömörülő anyag tömege és minél előbbre tart a sűrűsödésben, annál erősebb lesz a gravitáció, és annál szilárdabban marad egyben a test. Minél hidegebb a tömeg, annál lassúbb az egyes atomok és molekulák rendezetlen mozgása, annál kevésbé tudnak szétszóródni, és megint csak annál szilárdabban marad egyben a test.

A keletkezőfélben lévő Napnak nem jelentett problémát egy darabban maradni, hiszen a Naprendszer össztömegének több mint 99 százalékát birtokolja. Annak ellenére, hogy a Nap gömbje kizárólag gázokból áll, amelyek megfelelő körülmények között könnyen szétszlanak, mégis, még azután is, hogy a nukleáris folyamatok belob-

bantak és a hőmérséklete nagyon forróvá vált, vagyis amikor a szétszóródási tendencia óriási mértékben fölerősödött, a hatalmas erejű gravitációs tér minden baj nélkül összetartotta a szerkezetét.

A bolygóknak, amelyeknek jóval kevesebb hidrogénből és héliumból kellene fölépülniük, már nagyobb nehézségekkel kellene szembenézniük, ha ugyanezen a módon jönnének létre.

Úgy képzelhetjük el ezt a dolgot, hogy a bolygóképződés a fejlődőben lévő Naptól nagyon különböző távolságokban játszódik le, némelyiké nagyon közel, másoké nagyon távol. Mindegyikük csak nagyon lassan nőhet, mivel gravitációs terük épp csak hogy elegendő a szétszóródás legyőzéséhez. Ahogy azonban a bolygók nagyobbak lesznek, az erősebbé váló gravitációs tér egyre jobban fölülkerekedik a szétszóródáson, úgyhogy a fejlődő bolygó egyre gyorsabb és gyorsabb növekedésbe fog – ez az úgynevezett „lavina-effektus”. („Effectus” latinul annyit tesz: „hatás”).

Végül is a bolygók jókora hidrogén-hélium testek lesznek, amelynek a közepe összetömörödve csak módjával forrósodik föl. A bolygók középpontjában a hőmérséklet és a nyomás közel sem lesz olyan óriási, mint a sokkal nagyobb méretű Napban, így itt nem indul be a fúzió, ezért nem válnak pici csillagokká.

Ugyanakkor ahhoz elég nagyok lehetnek a bolygók, hogy anyaguk egyben maradjon, még akkor is, ha legbelsejükben a magas hőmérséklet megnöveli a szétszóró erőt. Szerencsére a bolygók anyaga rosszul vezeti a hőt, így bár középpontjuk forró, a felszínük hideg marad, márpedig a szétszóródási tendencia a felszínen a legveszélyesebb.

Lehet, hogy a bolygókeletkezés jobbára már befejeződött, amikor az összesűrűsödő Nap fényleni kezd, mert beindult benne a fúzió. Ekkor két új tényező lép működésbe.

Először is, a Nap sugárzást bocsát ki, ami fölmelegíti az újonnan kialakult bolygók felszínét. Másodsor, a Naptól minden irányban napszél indul ki.

A bolygók felszínének fölmelegedése ott erősíti a szétszóródási tendenciát, ahol az a leghatékonyabb, úgyhogy a bolygókról hidrogén- és héliumgözből álló felhők szállnak föl. Akkor aztán a napszél szinte kisöpri a bolygókról a gőzöket.

Természetesen mindkét hatás a Nap közelében a legerősebb és a távolsággal csökken. A Naphoz legközelebb eső bolygók párolognak a leginkább, és ezek vannak legjobban kitéve a napszél söprögető hatásának. Ezért ezeknek a közeli bolygóknak csökken a tömegük. Ettől viszont gravitációs térerejük is csökken, a gőzölgés, illetve söprés pedig fölgyorsul. Végül a közeli bolygók anyaga teljesen szétoszlik.

A Naptól távolabb a fűtő és söprögető hatás kisebb, és a viszonylag nagy tömegű bolygók túlélhetik őket. Ezeknek a bolygóknak a már kialakult holdjai viszont, mivel gravitációs terük sokkal gyengébb, nem maradhatnak meg.

Végeredményben tehát arra a következtetésre jutunk, hogy ha a Nap első generációs csillag volna, akkor lehetne ugyan néhány bolygója, amelyek távolsága és kémiai összetétele nagyjából a gázóriásokénak (Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és Neptunusz) felel meg –de más semmi. Nem léteznének olyan bolygók, amelyeken emberi élet egyáltalán elképzelhető, és nem létezne olyan anyag, amelyből élő szövet alakulhatna ki. Az a bolygórendszer, amely egy első generációs csillag körül kering, úgy látszik, teljesen élettelen volna.

A FÖLD KIALAKULÁSA

A Nap egy második generációs csillag, amely a szupernóváknak köszönheti létezését. Ezek szerint az a csillagközi felhő, amelyből a Naprendszer világra jött, négyféle anyagból állt.

Volt benne először is hidrogén és hélium s – második generáció ide vagy oda – ezek tették ki a felhő tömegének 97 százalékát. Jelen voltak másodsor olyan elemek, amelyek csak kevéssel nehezebbek a hidrogénnél és a héliumnál – legnagyobb gyakorisággal a szén, a nitrogén és az oxigén. Ezek a hidrogénnel vegyülve metánt, ammóniát, illetve vizet képeztek. Hármuk közül a víz fagy meg legkönnyebben, jég formájában. Ahogy a hőmérséklet tovább csökken, előbb az ammónia, aztán a metán fagy meg olyan anyagokká, amelyek pont úgy néznek ki, mint a jég. Azon az alacsony hőmérsékleten, amelyen a bolygók eredetileg alakot öltöttek, mindhárom vegyület (néhány más hasonló, de kevésbé gyakori anyaggal együtt) valószínűleg fagyott állapotban volt; általában mint „jegeket” emlegetjük őket.

Voltak aztán, harmadszor, még nehezebb elemek is, úgymint alumínium, magnézium, szilícium, vas és nikkel. Az alumínium, a magnézium és a szilícium (valamint néhány további, kevésbé gyakori elem) az oxigénnel vegyülve „szilikátokat” alkot. Ilyen szilikátokból állnak a Föld közetek.

S negyedszer: a vas- és nikkelatmok ugyan szilikátokban is részt vehetnek, gyakran azonban nagy mennyiségben gyűlnek össze viszonylag tiszta formában, más hasonló anyagok kisebb mennyiségeivel együtt. Ezeket hívjuk „fémeknek”.

Úgy tűnik, mivel az eredeti felhő tömegének 97 százalékát a hidrogén és a hélium adja, a kis mennyiségben jelenlevő nehéz elemek bajosan lesznek elegendőek egy Föld-típusú bolygó létrehozásához; úgyhogy a második generációs csillaggal sem járunk jobban, mint az első generációssal. Csakhogy a Naprendszer teljes tömege 343 600-szor akkora, mint a Földé. Ha ennek 3 százalékát teszik ki a nehéz elemek, akkor 10 000-nél több Föld-típusú bolygóra elegendő ilyen elemünk van.

Persze, a nehéz elemek több mint 99 százaléka a Napban marad, a Nap körül keringő összes bolygóanyag azonban együtt 448-szor

több, mint a Föld tömege. Ha ennek 3 százaléka nehéz elem, akkor még mindig annyi van belőlük, amennyiből több mint tizenhárom Föld-méretű bolygót lehetne fölépíteni.

Ez elég is, így aztán egy Föld-szerű bolygó mégiscsak létrejöhet az olyan második generációs csillag körül, mint amilyen a Nap.

Amikor egy második generációs csillag bolygói kialakulnak, a kő és a fém először összeolvad. A szilikátmolekulák és a fématomok az elektronjaik közti elektromágneses erő folytán szorosan összetapadnak, vagyis már nem a gravitáció tartja őket együtt. Még a nagyon magas, 2000-3000 fokos hőmérsékleten is apró darabkákká állnak össze.

Ily módon valószínű, hogy minden bolygó kőből-fémből álló maggal rendelkezik. Eleinte a kő és a fém elegyedik egymással, de ahogy a bolygó mérete nő és a közepe fölforrósodik, könnyebben szét tudnak válni – főleg ha elég meleg van ahhoz, hogy a fém megolvadjon. A kőzetek olvadáspontja persze magasabb, mint a fémeké, de még ha nem is olvadnak meg, ahhoz eléggé fölmelegszenek, hogy viszonylag lágyak legyenek. A fém, mivel sűrűsége nagyobb a kőénél, lassan leülepszik és összegyűlik a bolygó középpontjában, a kőzetanyagok pedig az ezt körülvevő burokból maradnak vissza.

A Földnek tehát kőburkolatú fémmagja van, csakúgy, mint a bolygók közül a Vénusznak és a Merkurnak. A Marsban és a Holdban, valamilyen még ismeretlen okból, viszonylag kevés fém gyűlt össze. Ami fém van bennük, az a szilikátokkal elkeveredve maradt, így ez a két égitest keresztül-kasul sziklás lett.

Ha egyszer a fémből-kőből álló mag létrejött, akkor gravitációs terének köszönhetően a fejlődő bolygó már sokkal könnyebben maga köré tud gyűjteni egy jégréteget, majd pedig eköré egy hidrogén-hélium elegyből álló réteget. Így aztán nagyon valószínű, hogy a második generációs csillagok körül gyorsabban formálódnak ki a bolygók, mint az első generációsok körül.

Mi történik akkor, amikor a Nap elkezd lángolni? A közelebb eső bolygók felszíne átmelegszik, és a napszél csapásaival is szembe kell nézniük.

A belső bolygók által begyűjtött összes hidrogén és hélium, illetve a jegek nagy része is elpárolog és kisöprődik. A fém- és kőmagok azonban, dacolva a hővel és a napszéllel, egyben maradnak.

A Merkúr annyira forró, a Hold pedig annyira kicsi, hogy a felületük teljesen lesöprődik. Ugyanez áll a kisbolygókra is, amelyek a Nap belobbanásának idején valószínűleg kisebb számúak, de nagyobb méretűek voltak. A Vénusz és a Föld elég nagy, a Mars pedig elég távol van a Naptól ahhoz, hogy a jegek egy kisebb része megmaradjon, eleinte talán lazán a szilikátokhoz kapcsolódva. Azokat az anyagokat is mind vissza tudták tartani, amelyek ma a légkörieket alkotják. A Föld nagyobb a Marsnál és hidegebb a Vénusznál, így

elég vizet tudott megmenteni ahhoz, hogy óceánok jöhessenek rajta létre.

A kisbolygókra nem hatott észrevehetően sem a napsugárzás, sem a napszél. Ezek teljesen (vagy majdnem teljesen) megőrizték az összegyűjtött jeget, illetve a hidrogén-hélium burkot. Ennek köszönhetjük a Jupitert, a Szaturnuszt, az Uránuszt és a Neptunuszt; a kevéske nehéz elemet leszámítva épp olyanok, mintha egy első generációs csillag szomszédságában alakultak volna ki és a körül keringének.

A Naprendszer külső övezetének hidegében és biztonságában kisebb égitestek is kialakulhatnak. Ezek egy része inkább sziklás, mint az Io, a Jupiter legbelső nagy holdja. Más részük inkább jeges, mint a Jupiter másik két holdja, a Ganymedes és a Kallisto vagy a Szaturnusz holdja, a Titán; olyan távoli égitestek is ebbe a csoportba tartoznak, mint a Plutó vagy az üstökösök. Olyanok is akadnak, amelyek egyaránt tartalmaznak követ és jeget, mint az Európa, a Jupiter negyedik holdja.

Akárhogy is: a Föld épp a megfelelő helyen, épp a megfelelő összetételben jött létre ahhoz, hogy alkalmas legyen az élet keletkezésére – ami pedig szupernóvák nélkül egyszerűen lehetetlen lett volna.

Az élet és az evolúció

A FOSSZÍLIÁK

Nem a Föld keletkezése volt az első eset, amikor a szupernóvák lekötelezettjei lettünk, s nem ez volt az utolsó sem. Azt sem hagyhatjuk figyelmen kívül, hogy milyen szerepet játszottak a szupernóvák az élet kialakulásában és fejlődésében. Ehhez azonban most át kell térnünk a csillagászatról a geológiára és a biológiára. Kezdjük azzal, hogy megvizsgáljuk, milyen volt bolygónk múltja!

Az utóbbi két évszázadban történtek ugyan erőfeszítések a Föld korának meghatározására, de 1896-ig, a radioaktivitás fölfedezéséig a geológusok kénytelenek voltak kizárólag spekulatív becslésekre hagyatkozni.

1907-ben Bertram Borden Boltwood (1870-1927) amerikai kémikus azzal a javaslattal állt elő: mivel az urán állandó és bár nagyon lassú, de könnyen kiszámítható sebességgel alakul át ólomra, próbáljuk meg a benne található urán és ólom mennyisége alapján meghatározni azt az időtartamot, amióta egy adott kőzet szilárd és érintetlen állapotban van.

Valóban sikerült kidolgozni olyan kormeghatározási módszereket, amelyek az urán bomlásán, illetve más, lassú radioaktív átalakulásokon alapulnak. Ezek a mérések végül is azt adták, hogy a Naprendszer és azon belül a Föld életkora 4,6 milliárd év. Legalább ennyi idővel ezelőtt sűrűsödött össze az eredeti gáz- és porfelhő azokká a nagyméretű, szilárd objektumokká, amelyek ma körülvesznek bennünket.

Mivel élete során a Föld mindenféle geológiai változáson ment keresztül, az persze nagyon valószínűtlen, sőt talán egyenesen lehetetlen, hogy bármilyen kőzet a bolygó létének kezdete óta érintetlen maradjon. A legöregebb földi kőzetek 3,4 milliárd évesek, így a Föld első egymilliárd évéről nincs közvetlen tanúbizonyságunk.

A Holdon, amely kisebb a Földnél, geológiai szempontból pedig kevésbé „élő”, 4,4 milliárd éves kőzetek is találhatóak. De még a Hold sem maradt kezdettől fogva teljesen érintetlen. Mind a Földet, mind a Holdat erőteljesen bombázták létezésük első néhány százmillió évében kisebb testek. Ennek a bombázásnak a nyomai, hála a szél-

128nek, a víznek és az életnek, a Földön már nincsenek meg, a Holdon viszont a becsapódások helyén nyilvánvaló bizonyítékként ott maradt a sok-sok kráter.

Szerencsére a meteoritok, ezek az aprócska égitestek szinte a kezdet kezdetétől érintetlenek maradtak. Ezek elemzése a legfőbb bizonyíték arra, hogy a Naprendszer kora 4,6 milliárd év.

Az élet nem kimondottan közelmúltbeli jelenség a Földön. Amint a kőzetek belsejében fölfedezett kővületek (latin eredetű nevükön: fossziliák) közvetlenül bizonyítják, az élet a Föld hosszú történetének legnagyobb részében jelen volt. Ezek a leletek az élet ősi formáinak megkövült darabkái; az, hogy „ősiek”, azért volt gyanítható, mivel jóval a felszín alatti kőzetrétegekben lelték őket.

Ilyenfajta leleteket már az ókorban följegyeztek, a Nyugat történelme során azonban sokáig vagy semmibe vették, vagy különböző mesterkéltnél módokon próbálták kimagyarázni őket. Ekkoriban ugyanis az uralkodó gondolatrendszer, meglehetősen dogmatikusan, azt tartotta, hogy a Föld, illetve az egész világegyetem mindössze pár ezer éves. Még a tudósok is óvakodtak attól, hogy elvessek ezt a dogmát vagy ellentmondásba kerüljenek vele.

Az 1800-as évek tudománya azonban már kénytelen volt tényként elfogadni, hogy a Föld nagyon-nagyon öreg.

A leletek abszolút korát a kutatók még nem tudták meghatározni, a relatív korukat viszont már igen. Meg tudták mondani, hogy melyik kőzet az idősebb – méghozzá úgy, hogy meghatározták, mennyire mélyen van a felszín alatt az a réteg (latinul szólva: „sztrátum”), amelyben az illető kőzetet találták. Kézenfekvő a föltételezés, hogy az üledékretegek az idők során nagyon lassan, fokozatosan lepték el a Föld felszínét, úgyhogy minél mélyebben fekszik a felszín alatt valamely réteg, annál öregebbek a benne levő kőzetek.

Ha egyszer a rétegek relatív korát meghatároztuk, akkor csak azt a réteget kell megjelölnünk, amelyben az illető fossziliát találtuk, s ezzel ennek a leletnek a relatív korát is megadtuk.

A legöregebb leleteket hordozó kőzeteket Adam Sedgwick (1785-1875) angol geológus kambriumiaknak nevezte el. A mai Wales ókori római nevét („Cambria”) adományozta nekik, mivel Sedgwick először Walesben tanulmányozott efféle kőzeteket.

Nem volt nehéz kideríteni, hogy a kambriumi leletek tengeri szervezetek maradványai. Az ebből az időszakból visszamaradt kővületek között szárazföldi életre utaló nyom nem akadt. Az élet uralkodó formáját különböző páncélos állatok jelentették, amelyeket trilobitáknak neveznek (magyar nevük: háromkaréjos ősrákok). Az ősi trilobitákra a ma élő állatok közül leginkább a kardfarkú tarisznyarak hasonlít.

Minden olyan ősi kőzetet, amely a kambriumiaknál is régebbi, közös néven prekambriumnak hívunk.

A radioaktív bomlás alapján alapuló kormeghatározás fejlődésével kiderült, hogy a legrégebbi kambriumi kőzetek, tehát a legidősebb

kövéletek is 600 millió évesek. Ez rettentően sok, ám a Föld teljes életkorához képest még a legöregebb fosszíliaak sem mondhatók régieknek.

Azokban a kőzetekben, amelyek a földtörténet első négymilliárd éve alatt (ez a Föld élettartamának hétnyolcada) ülepedtek le, nem találtak efféle kövéleteket. Lehet, hogy élet csak a Föld fennállásának legutóbbi egynyolcadában létezett?

A biológusok másképp vélekednek. A kőületképződés nagyon esetleges dolog, ami csak rendkívüli körülmények között megy végbe. Élőlények milliárdjai éltek és pusztultak el anélkül, hogy egyetlen megkövült darabkájuk is fennmaradt volna. Meglehet, hogy élőlények egész csoportjai sem hagytak maguk után semmilyen, ma föllelhető kőületet. Ugyanakkor ritkább szervezetekből véletlen folytán egész seregnyi fosszília is megőrződhetett.

Aztán meg a szervezet bizonyos részei inkább megmaradnak, mint a többiek. A fogak, csontok és páncélok, egy szervezet „kemény részei” sokkal könnyebben fosszilizálódnak, mint a lágy szövetek. Így négymilliótól ötvenezer évvel ezelőttig Afrikában és Euráziában bizonyos emberszerű lények kóboroltak, de nagyon kevés ásatag maradványunk van tőlük: túl értelmetlenek voltak ugyanis ahhoz, hogy gyakran lepje meg őket a halál kőületképződésre alkalmas körülmények között, s létező maradványaik is legnagyobb részét megkövesedett kemény részek, főleg koponyák és fogak.

A legidősebb leletek közé tartozó trilobiták héjas szervezetek, és már eléggé bonyolult szervezetűek.

Általában minél ősbibb egy szervezet, annál kevésbé fejlett, annál kevésbé bonyolult a szerkezete. Joggal tételezhetjük föl, hogy a kambriumi időszakot megelőzően az életnek még ősbibb, a trilobitáknál is kevésbé fejlett formái léteztek. Ezek olyannyira kezdetlegesek voltak, hogy semmilyen kemény rész sem volt bennük: kívül-belül olyan puhák voltak, mint a mai földigiliszták vagy a meztelen csigák, ezért eleve nem is hagyhattak maguk után kövéleteket. Vagyis a fosszíliaak hiánya nem föltétlenül annak a jele, hogy „nincs élet”, csupán annyit mond: „nincsenek kemény részek”.

Az 1950-es években *Elso Sterrenberg Barghoorn* (1915-1984) amerikai biológus a Felső-tó vidékén kékmoszatok megkövült telepeinek bukkant a nyomára. A kékmoszatok a sejtes élet ma létező legegyszerűbb formái közé tartoznak. Nagyon hasonlóak a baktériumokhoz, azzal a különbséggel, hogy klorofillt is tartalmaznak, ami a baktériumokból hiányzik.

Mind a kékmoszatok, mind a baktériumok egészen apró sejtekből épülnek föl, amelyeknek nincs elkülönült magjuk, helyett a maganyag az egész sejtben van szétszórva. Ezeket *prokariótáknak* nevezik (a „mag előtti” jelentésű görög kifejezésből). Az összes többit az egysejtű növényektől és állatoktól azokig a sejtekig, amelyekből a soksejtű szervezetek (önmagukat is beleértve) fölépülnek, *eukariótáknak* hívják (ez a görög szóösszetétel „valódi magot” jelent).

A kékmoszatok maradványait nem könnyű fölismerni. Annyira kicsik, hogy mikroszkóp alatt kell vizsgálni őket, és a piciny sejteket azok alapján az egészen finom szerkezeti jelek alapján kell azonosítani, amelyeken meglátszik, hogy biológiai, nem pedig ásványi eredetűek.

A feladat nem volt könnyű, de Barghoorn aprólékos munkával végül is képes volt meggyőző bizonyítékokkal szolgálni. Az elsőként azonosított és tanulmányozott *mikrofosszíliaak* kétmilliárd éves kőzetekből származtak. Miután rájött a dolog nyitjára, egyre öregebb és öregebb kőzetekben találta meg a nagyon egyszerű mikroszkopikus élet bizonyítékait. 1977-ben olyan dél-afrikai kőzetekben talált mikrofosszíliaakat, amelyek korát 3,4 milliárd évre becsülik.

AZ ÉLET LÉTREJÖTTE

A Föld 4,6 milliárd évvel ezelőtt alakult ki, de létezésének első néhány százmillió évében a folytonos zűrzavar állapotában volt. Felületét ugyanis nagyméretű anyagtörmelékek bombázták, amelyek még a Föld pályáján keringtek a Nap körül, s időről időre a Földnek vagy a Holdnak ütköztek.

Körülbelül négymilliárd évvel ezelőtt a Föld már elég nyugodt volt és eléggé megközelítette mai kinézetét ahhoz, hogy lakható legyen. Ezután nem több mint félmilliárd éven belül létre is jöttek az élet kezdeti formái. Az azóta eltelt 3,5 milliárd évben (teljes fennállásának háromnegyed részében), amennyire megállapítható, mindig rengetegféle élő szervezet népesítette be a Földet.

Hogyan keletkezett az élet?

A tudományos köyetkeztetés (amely nem föltételez természetfölötti beavatkozást, mivel ilyenre semmiféle bizonyítékunk sincs) csakis az lehet, hogy a Föld légkörében és óceánjaiban levő egyszerű molekulák véletlen kombinációi bonyolultabb, majd még bonyolultabb molekulákat eredményeztek. Végül olyan molekulák alakultak ki, amelyek már eléggé összetettek voltak ahhoz, hogy rendelkezzenek azokkal a tulajdonságokkal, amelyeket az étellel szoktunk kapcsolatba hozni.

Ezt a folyamatot nem tudjuk közvetlenül megfigyelni sem itt a Földön, ahol több milliárd évnvi idő választ el bennünket a történetektől, sem más égitesteken, mivel a legközelebbi lakható világ és miközöttünk sok fényévnyi tér áll. Közvetett bizonyítékokra viszont szert tehetünk.

Első lépésként azt kell meghatároznunk, milyen egyszerű molekuláknak kellett létezniük az ősi Földön. Abban a tudósok általában megegyeznek, hogy a jegeket alkotó molekulákról van szó. A pontos összetétel azonban némileg vitatott. Viz biztosan volt, s voltak nitrogéntartalmú, illetve széntartalmú molekulák is.

A Jupiteren és a Naprendszer külső részének más világain a szén

és a nitrogén hidrogénnel vegyülve (metánként, illetve ammóniaként) van jelen. A Vénuszon és a Marson a szén oxigénnel vegyül (széndioxid), míg a nitrogénatomok páronként nitrogénmolekulákban léteznek.

Egyes tudósok szerint a Föld őslégköre ammóniából, metánból és vízgőzből állott, az óceánban pedig nagy mennyiségben volt oldott ammónia. Mások úgy gondolják, hogy az őslégkört széndioxid, nitrogén és vízgőz alkotta, és az óceánban jelentős mennyiségű széndioxid oldódott föl. Az is lehetséges, hogy kezdetben a légkör ammóniát, metánt és vízgőzt tartalmazott (I-es légkör), s ez alakult át élettelen természeti folyamatok révén széndioxiddá, nitrogénné és vízgőzzé (II-es légkör).

Hogy melyik fajta légkört választjuk, az nem is olyan döntő. Mindegyikben ott található a hidrogén-, szén-, nitrogén- és oxigénatomok; ezek teszik ki bármely szervezetben a légy szövetek atomjainak 99 százalékát. A többi szövetet alkotó atomok, ideértve azokat is, amelyek a kemény szöveteknek a keménységet kölcsönzik, az ósíceánban oldva voltak föllelhetők.

Ha egyszer az akár ilyen, akár olyan egyszerű molekulák adottak, vajon milyen folyamatok szükségesek ahhoz, hogy bonyolultabb molekulák épüljenek föl belőlük? Az atomok sima ütközése és véletlenszerű kölcsönhatásai még nem elegendőek. Azok a reakciók, amelyekben egyszerű molekulák bonyolultabbakká alakulnak át, általában energiafogyasztó folyamatok. Más szóval, a rendszerrel energiát kell közölni, hogy ez a változás lejátszódhasson.

Az ősi Földön viszont többféle energiaforrás is rendelkezésre állt. A vulkáni tevékenység hője vagy a villámlás elektromos energiája egyaránt szóba jöhet. Sőt egészen valószínű, hogy kezdetben a Föld jóval viharosabb színtér volt, mint manapság: gyakoribbak voltak a vulkánkitörések, és égiháború is sokkal sűrűbben fordult elő.

Ne feledkezzünk meg a radioaktív energiáról sem: akkoriban még a radioaktivitás erőssége nagyobb volt, mint most, hiszen a Föld létrejötte óta eltelt évmilliárdok alatt a radioaktív atomok eredeti mennyiségének jelentős hányada mára már elbomlott.

Végül pedig ott volt a Nap ultraibolya sugárzása is. Ebből manapság csak kevés éri el a Föld felszínét, ugyanis a leyegő oxigénje (ennek minden egyes molekulája két oxigénatomot tartalmaz) a légkör felső rétegeiben ózonná alakul át (ennek a molekulái viszont háram oxigénatomból állnak). Ez a mintegy 25 kilométer magasságban levő ózonréteg az ultraibolya sugárzás nagy része számára átlátszatlan, így aztán annak csak kis része jut el a Föld felszínére.

Az oxigén azonban nem természetes alkotórésze a levegőnek. Túl aktív, sok más anyaggal vegyül, ezért ha magára hagynák, hamarosan eltűnne a légkörből. Csakis azért nem tűnik el, mert a zöld növények állandóan oxigént termelnek. Ezek a növények a napfény energiáját fölhasználva széndioxidból és vízből keményítőt és más olyan anyagokat építenek föl, amelyeket aztán az állatvilág minttáplálékot tud hasznosítani. Az oxigén e folyamat melléktermékeként képződik – így került a levegőbe.

Az ősi Földön, mielőtt az élet létrejött volna, természetesen semmiféle zöld növény sem létezett, nem volt tehát oxigéntermelő folyamat sem. Így a légkörben nem lehetett oxigén, és persze ózon sem a felső légkörben. Ez azt jelenti, hogy a Naptól jövő ultraibolya sugárzás akadálytalanul haladhatott egészen a földfelszínig.

1952-ben *Stanley Lloyd Miller* (1930–) amerikai vegyész gondosan megtisztított és sterilizált vízhez hidrogénből, ammóniából és metánból álló „légkört” adott, az I-es légkört hozva így létre. Ezt aztán villámlást utánozó, energiát szolgáltató elektromos kisülések közepette kevergette egy készülékben. Egy hét elteltével szétválasztotta a vizes oldat alkotórészeit. Úgy találta, hogy egyszerű szerves vegyületek jöttek létre, közöttük néhány *aminosav* is – ezek az élő szövet egyik fő alkotórészének, a fehérjének az építőkövei.

A kísérletet úgy is megismételték, hogy energiaforrásként ultraibolya fényt alkalmaztak, és lényegében ugyanezt az eredményt kapták. Mások a II-es légkörből indultak ki, és így is keletkeztek összetettebb anyagok.

Cyril Ponnamperna (1923–) Srí Lankán született amerikai biokémikus végzett ilyen típusú kísérleteket a legkitartóbban. Egyszerű vegyületekből *nukleotidokat* tudott létrehozni – ezek a nukleinsavaknak, az élő szövetek másik fő alkotórészének az építőkövei. Előállított adenzintrifoszfátot (ATP) is, amely az élő szövet energiaforgalmában játszik kulcsszerepet.

Mindezek a vegyületek, amelyeket az őslégkör elképzelhető változataiból *abiogén* úton (az élet közbeavatkozása nélkül – kivéve természetesen magát a kísérletezőt!) hoztak létre, egyaránt az élő szövet irányába mutattak.

Sidney Walter Fox (1912–) amerikai biokémikus más úton haladt. Aminosavak keverékéből kiindulva hő hatására fehérjeszerű anyagokat állított elő. Ezek vízben oldva piciny gömböket alkottak, amelyek rendelkeztek a sejtek bizonyos tulajdonságaival.

A kísérletek nem jutottak túl messzire: nem vezettek semmilyen, akár a legegyszerűbb módon élőnek mondható rendszerhez. Csakhogy a laboratóriumban kis mennyiségű oldattal, rövid ideig folyt a munka, s meglepő módon mégis történt előrelépés (noha kétségkívül csekély) az élő anyag felé. De mi a helyzet akkor, ha az egyszerű vegyületek egész óceánját képzeljük el, amely év-százmilliókon át kap energiát? Ebben az esetben nem nehéz elképzelnünk a *kémiai evolúció* időszakát, amely 3,5 milliárd évnél nem régebben végre primitív élő sejtek megjelenéséhez vezetett.

A FAJFEJLŐDÉS

Hány különböző alkalommal kellett az életnek megszületnie? A kékoszatok a kémiai evolúció egyik ösvényén jöttek létre, a baktériumok pedig egy másikon? Netán minden egyes kékoszat-, illetve baktériumféleség teljesen különböző ton-módon alakult ki? Voltak a kémiai evolúciónak más, kacskaringósabb útvonalai is, amelyek mindegyike más és más fajta trilobitában végződött? Megint mások a különféle dinoszauruszokban? Egy pedig az emberben?

Csöppet sem valószínű. Ha a kémiai evolúció milliányi különböző ösvényen haladt volna, külön-külön az egyes növények, állatok, illetve mikroorganizmusok felé, beleértve a legkésőbb keletkezetteket is, akkor olyan vegyületeknek is kellene létezniük, amelyek éppen most mennek át a kémiai evolúció folyamatán. Ilyeneknek azonban nyoma sincs.

Mi több, ha egyszer a kémiai evolúciót úgy magyaráztuk, mint ami az ősléggel rendelkező, élő anyag nélküli világban megy végbe, akkor nem logikus azt várnunk, hogy az oxigénes légkörű, élő anyagot tartalmazó világban is végbemenjen. Az oxigén annyira aktív, hogy az élő állapothoz közelítő, eléggé bonyolult vegyületekkel reakcióba lépve szétördeli, elroncsolja őket. (A mai élő szervezeteknek különböző agyafúrt módokon kell megvédelmeznük efféle vegyületeiket az oxigéntől.) Nem beszélve arról, hogy ha egyszer az élet létrejött, akkor bármely, az élő állapot közelébe fejlődő vegyület remek tápláléka lenne egy csomó teremtménynek, akik azt rögtön el is fogyasztanák.

Logikus tehát föltételeznünk, hogy az élet csak egyszer alakult ki az ősidőkben, vagy ha esetleg többször, akkor is a többi kísérlet egyetlen kivételével nem bizonyult eléggé életképesnek. Ha egyszer az élet egy bizonyos formája létrejött, fönmaradt és virágzásnak indult, ez nagy valószínűséggel véget is vetett a kémiai evolúciónak.

Ha viszont így van, az életnek miért nem ez az egyetlen formája létezik keletkezésétől mindmostanáig? Hogyan lehetséges, hogy az élet oly sok különböző formában létezett a múltban (ahogy erről a fossziliák tanúskodnak) és oly sok különböző formában létezik ma is?

A fossziliák vizsgálata alapján megállapítható, hogy az élet különféle formái között kisebb-nagyobb fokú rokonság áll fenn.

Az ősi élőlények bizonyos szempontból hasonlóak egyik vagy másik mai szervezethez, s a kettő között gyakran további kövületek sorozata jelzi, hogy a szervezetek az ősitől a maihoz vezető változáson mentek keresztül. Ezt egy csomó egyéb típusú, biokémiai vagy akár egyszerű megfigyelési adattal is alátámaszthatjuk.

A magyarázat a következő. A szervezetek, miközben reprodukálják önmagukat (a szülők kicsinyeket hoznak a világra, akik felnőnek és maguk is utódoknak adnak életet), apránként megváltoznak.

Egyes féleségeik („fajok”) kihalnak. Mások lassan, fokozatosan olyan szervezetté alakulnak át, amely már annyira eltér az eredetitől, hogy új fajnak tekinthető. Lesznek, amelyek két különböző utódfajt, vagy akár kettőnél is többet hoznak létre. Végeredményben tehát az élővilágban ma létező, hozzávetőleg kétmillió faj mindegyike (beleértve az egyetlen emberfajt, a *Homo sapiens* is) a korábbi fajok utóda, amelyek viszont még korábbiaktól származnak, és így tovább, vissza egészen az élet 3,5 milliárd évvel ezelőtti egyszerű formáiig, és azokon át az élet legelsőként létrejött formájáig, amelyet az azt megelőző kémiai evolúció eredményezett. Az élet e lassú fejlődését, amely a legegyszerűbb kezdeti formától az élő és kihalt fajok hatalmas sokaságáig vezetett, nevezzük *biológiai evolúciónak*.

A régi korok tudósainak két okból is nehéz volt elfogadni a biológiai evolúció fogalmát.

Elsőször is: a nyugati világban elterjedt vallás szó szerint ragaszkodott a *Bibliához*, amely nemcsak azt tanította, hogy a Föld alig néhány ezer évvel ezelőtt keletkezett, hanem azt is, hogy minden egyes faj külön természetfölötti aktus révén teremtett, vagyis hogy a fajok mindegyike kezdettől fogva létezik és különbözik a többitől. Attól tartottak, hogy a biológiai evolúció elismerése a vallás alapjait rázkódtatná meg, márpedig a tudósok többsége, őszintén vallásos lévén, nem akarta aláásni ezeket az alapokat. Még ha ahhoz eléggé tekintélyrombolók voltak is, hogy a megfontolt érvelést előnyben részesítsék a vakhittel szemben, jócskán tartaniuk kellett a földühödött társadalom reakciójától.

Másodszor pedig: ha voltak is olyan tudósok, akik meg voltak győződve róla, hogy ilyen evolúciónak lennie kellett, az még az ő számukra sem volt világos, hogy milyen mechanizmus révén mehetett végbe. A macskák kiscicákat, a kutyák kutyakölyköket, az emberek kisbabákat hoznak a világra, de a generációk között semmilyen változás sem utalt az evolúció folytatódására.

Elsőként *Jean Baptiste de Lamarck* (1744-1829) francia természetbúvár gondolt ki egy ilyen mechanizmust. 1809-ben föltételezte, hogy az élőlények bizonyos testrészeit erősen, másokat viszont alig használják. Az erősen használatba vett testrészek kifejlődnek, a kevésbé használtak pedig visszafejlődnek, s ezt aztán át is örökítik a leszármazottaiknak, akik tovább folytathatják a folyamatot, átadván az eredményt az ő leszármazottaiknak, és így tovább.

Mondjuk, egy bizonyos antilopnak, amely levelekkel táplálkozik, folyton nyújtózkodnia kell, hogy elérje a felső leveleket. Ahogy telnek az évek, a nyaka a nyújtózkodás következtében kicsit megnyúlik, a lábai úgyszintén. Hosszabb nyakát és lábát átörökíti az utódjának, aki folytatja a nyújtózkodást. Sok-sok generáció után végül is az antilop zsiráfá yálik. Ez olyan sok generáció során következik be, hogy egy emberöltő vagy akár az egész emberi történelem időtartama alatt sem vehetjük észre a változást.

Ez az elképzelés azonban („evolúció a szerzett tulajdonságok öröklődése révén”) tévesnek bizonyult.

Először is: az elvégzett kísérletek azt mutatják, hogy a szerzett tulajdonságok nem öröklődnek. Az 1880-as években például *August F. L. Weismann* (1834-1914) német biológus 1592 egér farkát vágta le a születésükkor, összesen huszonkét egymást követő generáción keresztül, és azt tapasztalta, hogy továbbra is mindegyik normális farkú egereket szült.

Másodszor: sokszor olyan testrészekhez kapcsolódó tulajdonságok is megváltoznak, amelyeket az állat nem szándékosan használ. Például az evolúció létre tudott hozni olyan testszint, amely képessé teszi az állatot arra, hogy beleolvadjon a környezetébe, ezáltal nagyobb biztonságban legyen az ellenségeitől. Az viszont aligha hihető, hogy például a kaméleon szándékosan igyekezne színt váltani, és ezért adna át egy hatékonyabb mechanizmust a kicsinyeinek.

1859-ben *Charles Robert Darwin* (1809-1882) angol természettudós, miután tizennégy éven át gyűjtötte a tárgyra vonatkozó bizonyítékokat, másféle megoldást javasolt.

Szerinte egy faj valamennyi generációja olyan tagokból áll, amelyek a legkülönbözőbb tulajdonságaik tekintetében egy kissé különböznek egymástól. Vagyis vannak közöttük lassúbbak és gyorsabbak, magasabbak és alacsonyabbak, erősebbek és gyengébbek, vörösebbek és kékebbek. A változatok apró eltérései véletlenszerűek, és az eltérő tulajdonságok egyikével rendelkező egyedek (átlagukat tekintve) sikeresebbek lehetnek a túlélésben, mint azok, amelyek a másik tulajdonsággal bírnak.

Előnyös tulajdonságaikat a túlélők átörökítik az utódaikra, akik között ismét lesznek az átlagnál lassúbb és gyorsabb, magasabb és alacsonyabb, erősebb és gyengébb, vörösebb és kékebb változatok. Megint csak a jobban alkalmazkodó változatok fognak tovább élni és elszaporodni, úgyhogy hosszú idő múltán maga a faj lesz sokkal lassúbb vagy gyorsabb, magasabb vagy alacsonyabb, erősebb vagy gyengébb, vörösebb vagy kékebb. Különböző helyeken vagy különböző körülmények között különböző változatok jutnak érvényre, így aztán a faj kezd két vagy több szisztematikus variációt mutatni, ami végül is két vagy több különböző fajt eredményez. Vannak esetek, amikor egyik változat sem terjed el, mivel egyikük sem életképes annyira, mint más fajok – ilyenkor az illető faj kihal.

A természet bizonyos értelemben „válogat” a véletlenül létrejövő változatok között; ez pedig nem más, mint „biológiai evolúció a természetes kiválogatódás révén”. Az evolúciónak ez a felfogása győzedelmeskedett. A Darwin óta eltelt egy és negyed évszázadban sokat finomítottak az elméleten, s állandóan vitatják hol ezt, hol azt a részét. De ha a biológusok vitatkoznak is az evolúció mechanizmusának részletein, senki sincs, aki vitatná magát az evolúció tényét –ahogy az ember elvitatkozgathat azon, hogyan is működik pontosan az óra, anélkül, hogy tagadná: valóban mutatja az időt.

A GENETIKA

Az egyik kérdés, amit Darwin homályban hagyott, így szólt: hogyan lépnek be a fajon belüli változatok az evolúció folyamatába? Tétélezzük föl, hogy egy faj néhány tagja valóban gyorsabb kicsit a többiekénél, és hogy ez a fürgeség az ő esetükben értékes tulajdonság, ami hozzájárul ahhoz, hogy inkább életben tudjanak maradni. Nem lehetséges, hogy ezek a gyors egyedek lassúakkal párosodjanak (hiszen párzás előtt az élőlények nem szokták megvizsgálni a másik életképességét), és így közepesen fürge kicsinyeket hozzanak világra? Nem lehet, hogy az élőlények közötti párosodás (ami nagymértékben a véletlen mülük) valójában az összes szélsőséges tulajdonságot lenyeli egy nagy szűrke középszert eredményezve, a természetes kiválogatódásnak pedig semmi sem marad?

1865-ben bebizonyosodott, hogy nem így van. *Johann Gregor Mendel* (1822-1884) osztrák szerzetes, amatőr botanikus borsófajokat keresztezett, és gondosan megvizsgálta, hogy mi történik a tulajdonságaikkal. Például hosszú szárú borsót keresztezett rövid szárúval, és úgy találta, hogy az utódok mind hosszú szárúak. Közepes szárú borsót egyáltalán nem kapott. Amikor ezeket az utódokat keresztezte egymás között, az újabb generációban 3 : 1 arányban fordult elő a hosszú, illetve rövid szárú borsó.

Mendel ezt úgy magyarázta, hogy minden növényben van valamiféle „faktor”, méghozzá kettő, és ezek határozzák meg a szár hosszúságát. (A „factor” latin szó, amely körülbelül annyit tesz: „tényező”.) A hosszú szárúaknak két olyan faktoruk van, ami a hosszúságot segíti elő; jelöljük az ilyen növényt LL-lel. A rövid szárúaknak ugyancsak vannak ilyen, ám az előbbiekkal nem azonos faktorai, amelyek a rövidságot felelősek; ezt jelöljük kisbetűkkel, így: ll.

Amikor hosszú szárú növényeket rövid szárúakkal keresztezünk, mindkettő egy-egy véletlenszerűen kiválasztódó „faktorral” járul hozzá minden egyes utódhoz. Egy LL növény bármelyik „faktorát” adja, annak L-nek kell lennie, az ll növénynek pedig egy l „faktorral” kell beszállnia. Minden utód mindkettőből szükségképpen rendelkezni fog eggyel-eggyel, tehát mindegyik vagy Ll, vagy ll lesz. Ebben az esetben az L a „domináns” (ismét egy latin szó, azt jelenti: „uralkodó”), és az a tulajdonság jelenik meg, amelyikért ő a felelős. Minden Ll és ll növénynek hosszú a szára, éppen olyanok tehát, mintha LL-ek lennének.

Az l „faktor” azonban nem tűnt el, még ha a hatása nem is érvényesül. Ha Ll és ll növényeket keresztezünk egymással, akkor mindegyikük egy L-lel járul hozzá az utódok egyik feléhez és egy l-lel a másik feléhez, teljesen véletlenszerű módon. Ezért négyféle utódot kapunk: LL, Ll, ll és ll jelűt. Ezek közül az első háromnak hosszú a szára, az utolsó pedig rövid, s ezzel meg is van a 3 : 1-es arány.

Mendel kimutatta, hogy egyéb tulajdonságok is ugyanígy visel-

kednek, és részletesen kidolgozta az úgynevezett „Mendel-féle öröklődési szabályokat”. Ezekből látható, hogy a véletlenszerű párosodások nem nyesik le a szélsőségeket, hanem azok fennmaradnak és újra meg újra föllépnek a következő generációkban.

Sajnos, Mendel nem volt ismert botanikus, munkája pedig megelőzte korát. Bár kísérleteit és következtetéseit közzétette, egészen 1900-ig egyáltalán nem vettek róluk tudomást, amikor is három másik botanikus egymástól függetlenül kitalálta ugyanezeket a törvényeket. Mindhárman fölfedezték azt, amire Mendel egy generációval korábban elsőként jött rá, és mindhárman, egymástól függetlenül, teljes mértékben igazolták az eredményeit.

A darwini elmélet legnagyobb nehézsége (a szélsőségek lenyesésére irányuló föltételezett tendencia) ezzel kiküszöbölődött.

Mégis, milyen a Mendel-szabályok érvényesüléséhez szükséges „faktorok” biológiai és kémiai természete?

1882-ben *Walther Flemming* (1843-1905) német anatómus beszámolt a sejtekkel kapcsolatos vizsgálatairól. Kidolgozta, hogyan lehet a sejteket megfesteni néhány új, a kémikusok által kifejlesztett szintetikus festékekkel. Bizonyos festékek csak a sejt egyes alkatrészein kötődnek meg, másokon nem. Egy bizonyos festéktől különösen a sejtmagban előforduló egyik anyag színeződött meg. Ezt az anyagot Flemming *kromatinnak* nevezte el (a „szín” jelentésű görög szóból).

Tudott dolog, hogy a mag lényeges szerepet tölt be a sejtek osztódásában, a magjától megfosztott sejt ugyanis nem képes osztódni. Flemming tehát megfestett egy olyan szövetből készített metszetet, amelyben a sejtek éppen élénk osztódásban voltak, és a kromatin mindegyik sejtben elszíneződött. A festék megölte a sejteket, s mivel mindegyik az osztódásnak egy kicsit más stádiumában volt, ily módon – mondhatni – a kromatin különböző állapotairól készült állóképek sorozata jött létre. Mihelyt megfelelő sorrendbe rakta őket, Flemming képet kapott a folyamat egymást követő fázisairól.

Ahogy a sejt osztódni kezd, a kromatin szemmel láthatólag rövid, vastag pálcikák csoportjába gyűlik össze, amelyek párokat alkotnak oly módon, hogy mindegyik fajta pálcikából két darab van. Flemming az egyes pálcikáknak (a görög „színes test” kifejezésből származó) *kromoszóma* nevet adta. A kromoszómák a sejt központi tengelye mentén sorakoznak föl és megkettőződnek, mégpedig úgy, hogy mindegyik létrehozza önmaga pontos mását. Most mindegyik kromoszómából két pár, azaz négy darab van jelen.

Azután a kromoszómák különválnak, mindegyik négyes készletből kettő-kettő a sejt egyik, illetve másik vége felé mozdul el. A sejt két sejtre válik szét, amelyek mindegyike egy-egy teljes készletre valót tartalmaz a párokba rendeződött kromoszómákból.

1887-ben *Edouard Joseph van Beneden* (1846-1910) belga biológus folytatta a kromoszómák tanulmányozását. Kimutatta, hogy a különböző fajokra jellemző az a szám, hogy hány kromoszóma van egy-egy sejtjükben. Például minden teljes emberi sejtben – ma mártudjuk – negyvenhat kromoszóma van, amelyek huszonhárom párba rendeződnek. Beneden azt is kimutatta, hogy ha egy szervezet petesejtet vagy spermiumot állít elő, akkor ezek a sejtek csak egy

fél készletnyi kromoszómát tartalmaznak, mindegyik párból egy-egy darabot. (Az emberi spermiumokban, illetve petesejtékben ezek szerint huszonhárom kromoszóma található.)

Amikor egy spermium megtermékenyít egy petesejtet, a megtermékenyített petesejt újra teljes kromoszómakészlettel fog rendelkezni: az egyik tag minden párban az apától, a másik az anyától származik. Így a megtermékenyített emberi petesejtnek huszonhárom pár kromoszómája lesz.

1902-ben, nem sokkal Mendel munkájának újráfelfedezése után, *Walter Stanborough Sutton* (1877-1916) amerikai biológus rámutatott, hogy a kromoszómák pontosan úgy viselkednek, mint a Mendel-féle „faktorok”, és valójában ezekkel a „faktorokkal” kell azonosaknak lenniük. Az öröklődést a kromoszómák szabályozzák.

Csakhogy: ha minden kromoszómát csupán egy-egy fizikai tulajdonság szabályozásáért tartanánk felelősnek, akkor a kromoszómák száma túl kicsi volna az öröklődés magyarázatához. Ezért minden kromoszómát sok-sok molekulából álló füzérnek kell elképzelnünk, ahol az egyes molekulák szabályozzák az egyes tulajdonságokat. 1909-ben *Wilhelm Ludwig Johannsen* (1857-1927) dán botanikus azt javasolta, hívjuk ezeket a molekulákat géneknek (a görög „szülni” szóból). Az a tudományág pedig, amelyik ezekkel a génekkel foglalkozik, a *genetika* nevet kapta.

A nukleinsavak és a mutációk

A GÉNEK SZERKEZETE

Mik a gének, milyen fajta molekulák?

A választ 1869-ben kezdték megsejteni, sokkal korábban, mint hogy a génekről Mendelen kívül bárkinek is tudomása lett volna. *Johann Friedrich Miescher* (1844-1895) svájci biokémikus azonosított egy, a sejtekben található anyagot, amely nitrogén- és foszforatomokat is tartalmazott. Ez az anyag végül is a *nukleinsav* nevet kapta, mivel úgy tűnt, hogy a sejtmagban (a „mag” latinul „nucleus”) fordul elő.

Kiderült, hogy a nukleinsavnak valójában két változata van. Az egyik a *ribonukleinsav* (rövidítve: RNS), a másik pedig a *dezoxiribonukleinsav* (DNS). A DNS az, amely valóban főleg a magban, mégpedig a kromoszómákban található. Az RNS általában a sejtnek a magon kívüli részében foglal helyet.

Eleinte nem szenteltek túl sok figyelmet a nukleinsavaknak. Meglehetősen egyszerű vegyületeknek gondolták őket, amelyekből olyan kevés van, hogy csak valamilyen jelentéktelen szerepük lehet. Másrészt a tudósok bizonyosak voltak benne, hogy az élő szövet igazán fontos molekulái a fehérjék, amelyek számtalan változatban léteznek, s amelyek között több száz atomból álló óriásmolekulák is vannak.

A fehérjék aminosavakból épülnek föl, az aminosavaknak pedig húsztípusú van, amelyek tetszőleges sorrendben kapcsolódhatnak egymáshoz. Elképzelhetjük a sok száz összeállt aminosavat, ahol mindegyik fajtaból egy-harminc darab van jelen. Minden különböző sorrend, amelyben ezek az aminosavak egymáshoz kapcsolódnak, egy-egy különböző fehérjemolekulát jelent, amelyeknek más-más tulajdonságaik vannak. Matematikailag olyan rengeteg aminosav-sorrend lehetséges, hogy sokkal több különböző fehérjemolekula képzelhető el, mint amennyi a világmindenségben létező atomok száma – még ha a világegyetem végestelen-végig atomokkal lenne is tele. Ha az élet határtalanul sokoldalú és bonyolult, akkor – úgy tűnt – ez csak azért lehetséges, mivel a végtelenül változatos fehérjemolekulákon alapszik.

A nukleinsav-molekula viszont *nukleotid* nevű egységekből épül föl.

Bármely nukleinsav-molekulában mindössze négyféle különböző nukleotidot találtak, és sokáig úgy gondolták, egy-egy nukleinsav-molekula mindössze négy nukleotidot tartalmaz, mindegyik fajtaból egyet-egyet.

A nukleinsavakat először *Martin L. A. Kossel* (1853-1927) német biokémikus vizsgálta meg alaposan. Kossel sok mindent föltárt a nukleotidok kémiai szerkezetéről, s arra is fölfigyelt, hogy a spermiumok különösen gazdagok nukleinsavban (valójában – mint ma már tudjuk – DNS-ben), és hogy az ott jelenlévő fehérje sokkal egyszerűbb a legtöbb fehérjénél.

Mivel a spermiumok kell hogy hordozzák az apától örökölt összes tulajdonságot, és mivel gyakorlatilag nem mások, mint szorosan összecsomagolt kromoszóma-kötegek, ezért fontosnak kell lennie, hogy milyen az összetételük. Minthogy tele vannak DNS-sel, viszont fehérjében elég szegények, természetes így utólag föltételezni, hogy az öröklődés szempontjából nem a fehérje, hanem a DNS a lényeg. Mindazonáltal a fehérjék fontosságába vetett rendíthetetlen hit lehetlenné tette Kossel (vagy a kor bármely más tudósa) számára, hogy eljusson ehhez a fölismeréshez.

1937-ben *Frederick Charles Bawden* (1908–) angol botanikus megtalálta az élet legapróbb formáját, egy *vírust*, amely nukleinsavat és fehérjét tartalmazott. A vírusok – ahogy ma már tudjuk – olyan élő szervezetek, amelyek semmi egyebet nem tartalmaznak, mint egy fehérjetokba burkolt nukleinsav-molekulát.

Mindegyik vírus tartalmaz nukleinsavat: némelyek DNS-t, mások RNS-t. (Vannak még sokkalta kisebb, *prion* nevű, a vírusokhoz hasonló molekulák is, ezekről azonban csak kevés bizonyosat mondhatunk e tekintetben.)

Mivel a vírúsmolekulák ilyen egyszerűek, sokkal kisebbek, mint a sejtek (majdnem olyanok, mint az elkülönített, önálló kromoszómák), s mivel ha egyszer bekerültek egy sejtbe, akkor képesek szaporodni, ezért a nukleinsav jelenléte lényeges kell hogy legyen. A kutatók azonban, bizonyosak lévén benne, hogy elsősorban a fehérjék a fontosak, egyszerűen föltételezték, hogy a vírusok fehérje-része az alapvető működési egység, és hogy a nukleinsavaknak csak valamiféle mellékes szerepük lehet.

A fordulat 1944-ben következett be. Ebben az évben *Oswald Theodore Avery* (1877-1955) kanadai-amerikai orvos a tüdőgyulladást okozó baktérium két változatát tanulmányozta. Az egyiknek a sejtjét sima tok veszi körül; ezt S-nek nevezik. A másik viszont nem rendelkezik ilyennel, ezért a felülete rücskös; ezt R-nek hívják.

Az R baktérium láthatóan elveszítette azt a génjét, amely a sima tok kialakítását lehetővé tette volna számára. Ha azonban az S baktériumot megölték és összezúzták, akkor az elpusztult sejt egyes alkotórészei oldhatók voltak, és amikor ezt a kivonatot hozzáadták az R baktériumhoz, a sejtek körül megindult a tok képződése. Az

S baktérium kivonatának tartalmaznia kell azt a gént, amely az *R* baktériumból hiányzik.

Avery és két munkatársa megtisztította a kivonatot, és mindent eltávolított belőle, amit csak lehetett, kivéve azt a valamit, ami az *R* baktériumnak a tokképző képességet adja. E munkát elvégezve úgy találták, hogy a kivonat egyáltalán nem tartalmaz fehérjét, nukleinsavat viszont igen. A nukleinsav, nem pedig a fehérje a gén.

Ekkoriban kezdték megérteni, hogy a nukleinsavak a fehérjékhez hasonlóan óriásmolekulák, amelyek láncra több száz, vagy akár több ezer, tetszőleges sorrendben összekapcsolódó nukleotidot tartalmaz. A vegyészek a nukleinsavmolekulákat csak azért vélték egyszerűeknek, mert olyan durván vonták ki őket a sejtéből, hogy darabjaikra töredezték. Finomabb eljárásokkal sértetlen molekulákat lehetett nyerni, s azok már óriásiaknak bizonyultak.

A kutatók végre komolyan elkezdtek foglalkozni a nukleinsavakkal, különösen a DNS-molekulával.

Két tudós, az angol *Francis H. C. Crick* (1916–) és az amerikai *James Dewey Watson* (1928–) 1953-ban meghatározta a DNS szerkezetét. Kimutatták, hogy a molekulák két nukleotidláncból állnak, amelyek kettős spirálba rendeződnek (ezek mindegyike csigalépcső formájú, és a kettő egymással párhuzamosan csavarodik fölfelé).

A két nukleotidláncot az atomjaik közötti kémiai kötések tartják össze, alakjuk pedig épp az ellentéte egymásnak. Más szóval, ha az egyik kifelé domborodik, akkor a másik befelé görbül és viszont, úgyhogy közvetlenül, szorosan illeszkednek egymáshoz.

Ezzel megoldódott az a probléma, hogy a DNS-molekula hogyan készít másolatot önmagáról (hogyan megy végbe a *replikáció*), amikor a sejtosztódás folyamán a kromoszómáknak egy újabb készletet kell létrehozniuk. A két nukleotidlánc szétnyílik, akár a lehúzott cipzár, és mindkettőjük egy-egy új lánc kialakításához szolgál öntőformául. Az újabb lánc ott fog kidomborodni, ahol az öntőforma begörbül, és fordítva. Ha a két láncot elnevezzük A-nak és B-nek, akkor *A* szolgál az új *B* öntőformájául, *B* pedig az új *A* öntőformájaként működik. Az új láncok azalatt jönnek létre, hogy a régi fölnyílik; így aztán mire a régi lánc teljesen kicipzárázódik, az eredmény két olyan lánc lesz, amelyek éppoly szorosan, gondosan be vannak cipzárázva, mint a régi volt.

1953 óta a tudósok részleteiben is megfejtették azt, hogy a DNS mi módon szabályozza a sejtet. Bár a DNS-molekula csupán a négyféle nukleotidot tartalmazza, a szabályozásban mégsem az egyes nukleotidoké a kulcsszerep. A DNS olyan csoportok (úgynevezett *triplettek*) révén működik, amelyek három, egymást követő nukleotidból állnak. Egy triplett első helyén a négy különféle nukleotid közül bármelyik állhat, a második és a harmadik helyén ugyancsak. Az egymástól különböző triplettek száma így módon $4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$ lesz.

Mindegyik triplett egy bizonyos aminosavnak felel meg. (Triplettből több különböző van, mint aminosavból, úgyhogy ugyanahhoz az aminosavhoz két vagy három triplett is tartozhat.) A kromoszóma hosszú DNS-láncának adott szakasza (egy ilyen szakasz tesz ki egy gént) egy olyan aminosavlánc termelését tudja irányítani, amely megfelel a saját szerkezetét alkotó triplettláncnak.

Az a fehérje, amely ezáltal létrejön, egy *enzim* lesz; ez a sejtben végbemenő bizonyos kémiai folyamatok sebességét képes szabályozni. A kromoszómákban levő gének összessége irányítja valamennyi enzim keletkezését a sejtben. Az enzimek természete és relatív mennyisége teszi lehetővé, hogy a sejt ellássa jellegzetes funkcióit; és amikor az összes sejt összeállt, akkor előttünk áll egy emberi lény (vagy valamilyen más szervezet – attól függ, hogy milyen jellegűek voltak a gének).

Mivel a gének a szülőkből kerülnek át az utódokba, ez utóbbiak ugyanahhoz a fajhoz tartoznak, mint az előbbiek. Így nem csupán arról van szó, hogy a kutyáktól kutyák származnak, hanem arról is, hogy a vadászkopók vadászkopókat hoznak a világra; sőt, egy adott vadászkopópárnak a kölykein ott lesznek a szüleik foltjai és egyéb jellegzetességei is.

HOGYAN VÁLTOZNAK MEG A GÉNEK?

Ekkor azonban a következő kérdés merül föl: ha a DNS-molekula pontosan lemásolja önmagát, és úgy kerül át a szülőkből az utódokba, akkor miért nem rendelkezik minden élőlény ugyanolyan génkészlettel, következésképp miért nem pontosan ugyanazok a testi tulajdonságai valamennyi élőlénynek?

Miért és hogyan fejlődtek ki különböző fajok? Hogyan lehetséges, hogy a tulajdonságok egy adott fajta, mondjuk a vadászkopók esetében alomról alomra, sőt még egyetlen almon belül is eltérők? Miért nézünk ki másként, mint a bátyánk vagy a nővérünk'?

A válasz a következő: a DNS replikációja nem föltétlenül tökéletes. Amikor a sejtben úszkáló különálló nukleotidokból a hosszú nukleotidlánc létrehozza önmaga mását, olykor egy nem megfelelő nukleotid furakszik oda, és mielőtt újra leválna, a lánc valamelyik oldalon folytatódik; ilyenkor a téves nukleotid rögzül az adott helyen. Az *A* lánc így egy csöppet félresikerült *B** láncot hoz létre (a csillag azt jelzi, hogy egy hibás nukleotid van jelen). A következő replikációban a *B** lánc a neki megfelelő *A** új láncot állítja elő, így módon az adott faj adott egyedében egy félresikerült DNS-molekula lesz jelen.

A DNS-molekula kismértékű megváltozása is képes módosítani a tulajdonságokat, néha egészen jelentős mértékben. Ez azt jelenti, hogy az utód nem változatlan kópiája a szüleinek. Időnként az utódoknak olyan jellegzetességeik vannak, amelyek egyik szülőnél

sem voltak meg, hanem távolabbi ősökre vezethetők vissza. Néha pedig az utódok olyan tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyekről tudjuk, hogy semelyik ősüktől sem származhat.

Azok, akik háziállatokat tartanak, tudják, hogy az állatok néha teljesen hibás színekben, vagy abnormálisan rövid lábbal, esetleg két fejjel jönnek világra, vagy valamilyen más módon mutatnak teljesen meglepő, új tulajdonságokat. Az ilyen utódokat „korcsoknak” nevezték, de a tudomány nem sokat törődött velük.

1886-ban azonban *Hugo Marie De Vries* (1848-1935) holland botanikus (később ő lett az egyike annak a három tudósak, akik újra fölfedezték Mendel törvényeit) egy virágcsoportozatra lett figyelmes, amely egyazon fajhoz tartozó és nyilvánvalóan egyetlen virág magjaiból nőtt, mégis egymástól különböző növényekből állt. Szaporítani kezdte őket, és rájött, hogy az utódok egyszer-egyszer fontos sajátosságokban sem hasonlítanak a szülőkre. Ezeket az ugrásszerű változásokat *mutációknak* nevezte el (a latin „változás” szóból).

Amikor kiderült, hogyan megy végbe a DNS replikációja, arra is azonnal rájöttek, hogy a mutációkat a replikációs folyamat tökéletlenségei eredményezik.

De miért lépnek föl tökéletlenségek? Nos, semmi sem működik örökké tökéletesen. Amikor egy új nukleotidlánc összeáll, mindig van rá esély, hogy véletlen molekulaütközések révén téves nukleotid csapódjék a mintául szolgáló lánc adott pontjához. A hibás nukleotid rendszerint nem tapad oda, hanem visszalökődik, hébe-hóba azonban véletlenségből éppen úgy közelít, hogy elég ideig tapad oda ahhoz, hogy belépjen a láncba.

Képzeljünk el analógiaképpen egy csomó embert, akik egy találkozóra gyűlnek össze! A kabátját mindenki fölakasztja egy ruhatáros nélküli ruhatárban. A találkozó végén mindannyian bezsúfolódnak a ruhatárba, hogy hozzájussanak a kabátjukhoz. Mindegyikük tényleg a saját kabátját akarja, és többé-kevésbé tudja is, hogy hová tette. Egészen véve várható, hogy mindenki a saját kabátjával fog fölbukkanni. És mégis, olykor-olykor – jól tudjuk – lesz olyan, aki teljesen véletlenül valaki másnak a kabátjával jelenik meg.

A mutációk ugyanezen elv szerint jönnek létre. És bár ilyenek csak nagyon ritkán fordulnak elő, a gének ezrei és a sejtosztódások milliárdjai olyan sok replikációval járnak, hogy a mutációk teljes száma mégiscsak nagy lesz. Lehet, hogy minden élőlény néhány mutációval születik. Ez hozza létre a faj minden generációjában a változatokat (bár ilyeneket a környezeti különbségek is előidéznek, úgymint az utódok számára hozzáférhető élelem mennyisége és minősége, a betegségek, illetve testi károsodások megléte vagy hiánya stb.), és ezekből a változatokból hozza létre a természetes kiválogatódás az evolúciós változásokat.

A véletlen által felszínre dobott változatok többsége előnytelen, hátrányos. Így ha valaki rossz kabátot vesz föl a ruhatárban, akkor

egészen valószínű, hogy az nem illik rá, vagy nem fog tetszeni a fazonja. Az ilyen „mutáció” hátrányos, és legjobb, ha az illető visszaszerzi a saját kabátját.

Viszont az ember nagyon ritkán olyan kabátot is találhat, ami tényleg jobban tetszik neki, mint a sajátja. Még ha vissza is kell adnia a jogos tulajdonosának, eszébe juthat, hogy ilyet vásároljon magának, ezáltal átveszi, magáévá teszi ezt a „mutációt”.

Hasonlóan, a DNS-molekula tökéletlen másolásakor keletkező mutáció is lehet nagy ritkán így vagy úgy jótékony hatású. Segítheti az élőlényt abban, hogy sikeres legyen az élete, hogy jobban tudjon alkalmazkodni, sok utódot bírjon létrehozni, akiknek majdnem mindegyike örökölni fogja ezt a mutációt.

Még ha minden „jó” mutációra 10 000 „rossz” jut is, akkor is az előnyös mutáció lesz az, amelyik a faj egyre több és több egyedében él tovább, a hátrányosak viszont idővel mind kihalnak. Végeredményben az evolúciós változások mindig úgy működnek, hogy a fajokat egyre sikeresebbé tegyék.

Általában nemigen törődünk azokkal a változásokkal, amelyek nem működnek jól és kiküszöbölődnek. Mindössze a kevés hasznos változásra szoktunk tekintettel lenni. Ezért olyan nehéz elhinni, hogy az evolúciós változás véletlenszerű, s nem áll mögötte egy vezérlő értelem. Ha az összes változást figyelembe vennénk, a károsakat és a hasznosakat egyaránt, akkor azonnal nyilvánvalóvá válna, hogy mindez a véletlenül alapszik, és hogy a természetes kiválogatódás (amelynek hatalma a sokból egyet megőriz, a többit kiselejtezi) kölcsönzi a cél és irány látszatát.

Tehát a mutáció folyamata, a DNS replikációjának tökéletlen volta yiszi előre az evolúciót, s az emberi lények létrejöttét is ez tette lehetővé. Ha nem lett volna mutáció, ha a DNS replikációja abszolút tökéletesen ment volna végbe, akkor az élet elsőként kialakult egyszerű darabkája önmagához pontosan hasonló darabkákat eredményezett volna, és a dolog itt véget is ért volna. Akkor ma az összes létező élőlény az élet ama kezdeti, egyszerű formájának lenne a másolata.

Csakhogy pusztán a véletlen körülmények folytán bekövetkező mutációk nem elég gyakoriak ahhoz, hogy magyarázatot adjanak arra a gyorsaságra, amellyel az evolúció folyamata végbement. Ha abból indulunk ki, hogy egymillió évig vagy még tovább is eltart, amíg egy faj átfejlődik egy másikba, nem gondolnánk, hogy az evolúció különösebben gyors folyamat; márpedig gyorsabb, mint amit a véletlenszerű mutációk önmagukban lehetővé tesznek.

Mivel a mutációk gyakoribbak, mint amennyit a pusztán véletlenség megenged, kell hogy legyenek olyan események a Földön, amelyek fokozzák a mutációs arányt.

Ilyet a kabátos-ruhatáros analógiánkban is láthatunk. Tegyük föl, hogy az derül ki: a vártnál jóval többen sétálnak ki nem a saját kabátjukkal! Ilyenkor kell lennie valaminek, ami megnövelte a hiba-

arányt. Kialudhatott a ruhatár egyik lámpája, és a gyöngébb világításban nehezebb helyesen választani a hasonló kabátok között, ezért lehetnek a hibák gyakoribbak. De az is lehet, hogy mindenki sokat ivott. Bizonytalanra vált látás, elgyöngült ítélőképesség esetén a hibák aránya növekedhet. Fölmerülhet egy harmadik lehetőség is: hátha válsághelyzet alakult ki. Amikor mindenki a ruhatárban van, egy „Indul a busz!” kiáltás mindannyiukat kapkodásra készítheti, és a hibák száma ugyancsak megnőhet.

MUTÁCIÓT KIVÁLTÓ TÉNYEZŐK

Mindazt, ami a mutációk arányát növeli, mutációt kiváltó tényezőknek vagy rövidebben (a görög „változást okozó” szóösszetételből) *mutagén* tényezőknek nevezzük. Melyek azok a mutagén faktorok, amelyek növelni tudják a mutációs arányt, és így felelősek lehetnek az eyolúció megfigyelt sebességéért?

Az egyik ilyen tényező a hőmérséklet emelkedése. Minél magasabb a hőmérséklet, annál gyorsabban izegnek-mozognak az atomok és a molekulák, s annál nehezebb pont a megfelelőt választani ki a sokaságból. A mutációs arány úgy emelkedik, ahogy a hőmérséklet növekszik.

Az élet azonban az óceánban fejlődött ki, és ott is maradt körülbelül 400 millió évvel ezelőttig. Más szóval, földi létezésének kilenczede alatt az élet kizárólag az óceánban volt föllelhető.

Márpedig az óceáni környezet sokkal stabilabb, mint a szárazföldi. Az óceán hőmérséklete évszokról évszakra, évről évre nem nagyon változik (semmiképpen sem olyan mértékben, mint a szárazföldön). Így az élet csaknem egész története során a hőmérséklet alig volt hatással a mutációkra, és nem tehetett olyan gyorsra az evolúciót, mint amilyenek tapasztaljuk.

Mutációkat keltenek bizonyos kémiai vegyületek is, mivel hajlamosak egyesülni a DNS-sel, és így jelenlétük rendellenességekhez vezet a replikációs folyamatban. Vagy esetleg oly módon hatnak a DNS-re, hogy bár nem vegyülnek vele, de megváltoztatják a molekulát alkotó atomok egy részének elrendeződését. Az a DNS-molekula, amelyben az atomok sorrendje szabálytalan, a replikációban szabálytalan öntőformaként szolgál és mutációt eredményez.

Ha azonban egy élőlény nagyon érzékeny azokra a kémiai anyagokra, amelyekkel rendszeresen találkozik, akkor az illetet annyira elárasztják a mutációk (ezek legtöbbje hátrányos), hogy gyorsan ki is pusztulnak. A természetes kiválogatódás ereje azokat választja ki, amelyek valamilyen okból ellenállóak a mutagén vegyületekkel szemben, úgyhogy végül az eyolúciót gyorsító tényezőkként ezek sem igen jöhetnek szóba.

Manapság persze a mutagén anyagok komoly problémát jelentenek. A vegyészek sok ezer olyan vegyületet állítottak elő, amelyek

a természetben nem léteznek, és amelyekből jelentős mennyiség került a környezetünkbe. Ezek egy része mutagén vegyület, és mivel az élőlényeknek korábban nem volt módjuk találkozni velük, így még nem tettek szert velük szemben ellenállóképességre a természetes kiválogatódás révén. Ezért aztán sok élőlényre (az embert is beleértve) ártalmasak lehetnek.

Egyes mutációk például a normális sejteket rákos sejtekké változtatják azáltal, hogy egy rendellenes gént, úgynevezett *onkogént* hoznak létre (az „onko” a görögben abnormális növekedést jelent, amelyet a rák okoz). Azokat a mutagén vegyületeket, amelyek ilyen változást idéznek elő, rákkeltő anyagoknak vagy (a görög „rák” szóból) *karcinogén* anyagoknak hívjuk, mivel ez a betegség időnként úgy terjed szét minden irányban, mint a rák lábai.

Azoknak az évmilliárdoknak a során azonban, amelyek a kémia fejlődésének utóbbi évszázadát megelőzték, a mutagén vegyületek nemigen jelentettek problémát, és az eyolúciós változások sebességére sem adhatnak magyarázatot.

Hermann Joseph Muller (1890-1967) amerikai biológus talált először olyan mutációt kiváltó tényezőt, amely sokkal hatékonyabb, mint a hő vagy a vegyszerek. Muslicákkal dolgozott és várta a véletlenszerű mutációkat, hogy megfigyelhesse, hogyan öröklődnek ezek a mutációk. A véletlen mutációkra várakozni azonban túlságosan unalmas és időrabló foglalatosság, ezért azt kezdte keresni, mi módon lehetne fölgyorsítani a mutációs sebességet.

1919-ben a muslicaállománya lakóhelyén megemelte a hőmérsékletet, és a mutációs arány nagyobb is lett, de nem eléggé.

Ekkor támadt az ötlete, hogy röntgensugarakkal próbálkozzék. Ezek több energiát adnak, mint az óvatos melegítés, és teljes terjedelmében átjárják a szervezetet. Ha a muslica testén áthatolva a röntgensugár történetesen egy kromoszómába ütközik, akkor energiája elegendő ahhoz, hogy itt-ott atomokat üssön ki a helyükből. Ez elkerülhetetlenül kémiai változashoz, vagyis mutációhoz vezet. Muller nem tudta, hogy milyen a gének kémiai természete (még harminc évig nem tudta senki), de akármilyen legyen is, abban biztos volt, hogy a röntgensugarak megváltoztatják.

S igaza is lett. 1926-ra kétséget kizáróan bebizonyította, hogy a röntgensugarak nagymértékben növelik a mutációs arányt.

Mások is vizsgálni kezdték ezt az újfajta hatást, és kiderült, hogy a mutációs arányt bármilyen nagyenergiájú sugárzás megnöveli. Ugyanilyen hatásuk van az ibolyántúli sugaraknak, a radioaktív anyagokból jövő sugárzásnak úgyszintén.

Mégis, hogyan lehetne a nagyenergiájú sugárzás a felelős azért a mutációs arányért, amely az eyolúciós folyamat gyorsaságához vezetett? A röntgensugárzást az emberi technika hozta létre a múlt század végén, azt megelőzően viszont alig fordult elő a Földön. Igaz, a napkorona állandóan sugározza, ahogy más égi objektumok is, ezt azonban a légkör jobbra elnyeli, és nem jut el a Föld felszínére.

Radioaktív anyagok persze vannak a Földön, sőt az élet gyermekkorában akár kétszer ennyi is lehetett. Ezeket azonban legnagyobb részben a talaj tartalmazza, így a tengeri életre nemigen lehetnek hatással. Még a szárazföldön sem egyenletesen oszlanak el, és csak néhány hely van a Földön, ahol a természetes radioaktív források a mutációk szempontjából jelentőséggel bírhatnak.

A Nap ibolyántúli sugárzása egyrészt kevésbé veszélyes, mint a röntgensugarak vagy a radioaktív sugárzás, mivel kisebb energiájú azoknál. Másrészt az ibolyántúli sugárzás mindig jelen volt a napfényben, különösen azokban a korai időkben, amikor a magaslég-körben még nem alakult ki az ózonréteg.

A napfény, benne az ibolyántúli sugárzással, úgy látszik, nem hagyható figyelmen kívül. Az ibolyántúli sugárzás energiája (abban a mennyiségben és hullámhossztartományban, amely az ózonréteg kialakulása előtt jelen volt) olyan nagy, hogy nem csupán mutációk létrehozásához, hanem olyanfajta kémiai változások előidézéséhez is elegendő, amelyek azonnal megölik az élő szervezetet. Amíg az ózonréteg nem volt elég vastag ahhoz, hogy meg tudja állítani a legnagyobb energiájú napsugarakat, addig végzetes lett volna kilépni a szárazföldre, a teljes erővel tűző napsütésbe.

A víz viszont sokkal hatékonyabban nyeli el az ibolyántúli sugárzást, mint a levegő. A tengeri élet kifejlesztette azt a viselkedést, hogy az élőlény több méterrel a felszín alá merüljön, amikor a Nap közvetlenül a felszínre süt. A kezdetleges tengeri élőlények akkor emelkedhettek föl a felszínre, amikor a Nap a látóhatár közelében járt (netán éppen alábukott), vagy amikor felhős napok jöttek. Miután kialakultak a növényi sejtek és működésükhöz elengedhetetlenné vált a napfény, ezek a sejtek addig a mélységig süllyedhettek le, amely még biztosította számukra a fotoszintézis folytatásához elegendő sugárzás föl vételét, de már nem jelentett halálos veszélyt a számukra. Amint a növényi sejtek kifejlődtek, természetesen hamarosan létrejött az oxigénben dús légkör és felső rétegeiben az ózonréteg, úgyhogy az ibolyántúli veszély nagyrészt megszűnt.

De ha az eddig említett összes mutációt kiváltó tényező viszonylag hatástalan, akkor hogyan adhatunk számot az evolúció gyorsaságáról? A válasz megtalálásához máshonnan kell kiindulnunk.

A KOZMIKUS SUGÁRZÁS

Azután, hogy a XIX. század utolsó évtizedében fölfedezték a radioaktív sugárzást, a tudósok olyan eszközöket is kifejlesztettek, amelyekkel ki lehet mutatni ezeket a sugarakat. Nagy meglepődéssel tapasztalták, hogy ahol (legjobb tudomásuk szerint) semmiféle radioaktív anyag sem volt a közelben, műszereik ott is észleltek némi sugárzást. Mi több, ha a műszereket ólomlemezrel vették körül, ami

átlátszatlan a radioaktív sugárzás (és az akkor ismert minden más sugárzás) számára, azok még így is sugárzást jeleztek.

Nyilvánvalóan egy olyan sugárzásról volt szó, amelynek nemcsak az eredetét nem ismerték, hanem amelyik bármelyik ismert típusnál áthatóbb (és így nagyobb energiájú) volt. Nagyobb volt az energiája, mint a radioaktív anyagok bármelyike által kibocsátott gamma-sugárzásnak, márpedig ez még a röntgensugaraknál is nagyobb energiával rendelkezik.

Föltételezték, hogy ez az újfajta sugárzás valamilyen, a talajban levő anyagból ered, valamiféle szuper-radioaktív anyagból – ez azonban nem volt több pusztán föltevésnél. *Victor Franz Hess* (1883-1964) osztrák fizikusnak jutott eszébe, hogy ez elég könnyen ellenőrizhető, ha sugárzásmérő eszközöket engednek föl léggömb segítségével a levegőbe. Minél magasabba emelkedünk, a sugárzásnak annál gyengébbnek kell lennie, feltéve, hogy forrása valóban a talajban van.

1911-ben hozzá is fogott, és tíz, műszerekkel ellátott léggömböt küldött fel, ötöt nappal, ötöt pedig éjjel. Az egyik nappali fölbocsátás egy teljes napfogyatkozás idején történt. Megdöbbenve látta: egyáltalán nem az derül ki, hogy a talaj lenne a forrás – sőt, éppen ellenkezőleg. Minél magasabba emelkedett a léggömb, az áthatoló sugárzás annál erősebbé vált. A forrás nyilvánvalóan az égbolton, nem pedig a talajban van. Sőt, a sugárzásért még csak nem is a Nap a felelős, hiszen az nappal is, éjszaka is ugyanolyan erősségű.

Amennyire Hess és mások megállapíthatták, a sugárzás az ég minden részéből egyformán jön. Ezért ezt *Robert Andrews Millikan* (1868-1953) amerikai fizikus, minthogy általában a kozmoszból jön, találóan *kozmosz sugárzásnak* keresztelte el. Millikan úgy gondolta, a kozmosz sugárzás nem más, mint az elektromágneses sugárzás egy formája, amely különbözik a közönséges fénytől.

Az elektromágneses sugárzás hullámként viselkedik. Minél kisebbek a hullámok (azaz minél rövidebb a hullámhossz), a sugárzás annál nagyobb energiájú. A látható fény színe rövid hullámokkal kezdődik, aztán ahogy a különböző színű fények jönnek sorban, végül a vörös fénynek van a legnagyobb hullámhossza, tehát a legkisebb energiája. Ha visszafelé haladunk a színekben a vöröstől a narancson, a sárgán, a zöldön és a kéken keresztül az ibolyáig, a hullámhossz egyre rövidebb, az energiataralom egyre nagyobb lesz.

Az ibolyántúli sugárzásnak rövidebb a hullámhossza, mint az ibolyaszínű fénynek, ezért a látható fény bármelyik formájánál nagyobb energiával rendelkezik. A röntgensugarak még kisebb hullámhosszúak, a gamma-sugárzás hullámhossza pedig ennél is rövidebb. Millikannek az volt a véleménye, hogy a kozmosz sugarak ultrarövid gamma-sugarak, a közönséges gamma-sugarakénál nagyobb energiával és áthatoló képességgel.

Egy másik amerikai fizikus, *Arthur Holly Compton* (1892-1962) vitatta ezt az álláspontot. Ő úgy vélte, a kozmosz sugárzás nagyon

gyors, elektromos töltéssel bíró, az atomoknál kisebb részecskéket kell hogy tartalmazzon. Energiájuk az impulzusukból ered, ami tömegüktől és sebességüktől függ.

A vita eldöntésére a következő lehetőség adódott.

Ha a kozmikus sugárzást elektromágneses hullámok alkotják, akkor nincsen elektromos töltése, és nem hat rá bolygónk mágneses tere. Ez esetben, mivel az égbolt minden részéből egyformán jön, azonos módon éri el a Föld különböző pontjait.

Ha viszont a kozmikus sugárzás elektromosan töltött részecskékből áll, akkor hat rájuk a Föld mágneses tere: a Föld mágneses sarkai felé téríti el őket. Ezek a kozmikus részecskék (már ha valóban részecskékről van szó) olyan nagy energiával rendelkeznek, hogy elhajlásuk egészen kicsiny lesz. Compton számításai mindazonáltal azt mutatták, hogy az eltérésnek észlelhető mértékűnek kell lennie, még hozzá minél messzebb megyünk általában az egyenlítőtől északra vagy délre, a kozmikus sugárzásnak annál erősebben kell záporoznia.

1930-ban Compton fölcsapott világutazónak, hogy e föltevést ellenőrizze, és valóban be tudta bizonyítani, hogy neki volt igaza. A „szélességi effektus” valóban létezik, vagyis a kozmikus sugárzás a magasabb szélességi fokokon tényleg erősebb. Millikan ugyan makacsul ragaszkodott a véleményéhez, de a fizikustársadalom fokozatosan Compton mögé sorakozott föl. A kozmikus sugárzás részecske-természete napjainkban általánosan elfogadott tény.

Mint az ma már köztudott, a kozmikus sugárzás nagyrészt pozitív töltésű, az atomoknál kisebb részecskéket, főleg hidrogén-, illetve héliummagokat tartalmaz, hozzávetőleg 10 : 1 arányban. Elszórtan nehezebb magok is előfordulnak benne, egészen a vasig. A kozmikus sugárzásban az atommagok hasonlóképpen oszlanak meg, mint amilyen az elemek megoszlása általában a világegyetemben.

Nincs mit csodálkozni azon, hogy a kozmikus sugárzás olyan nagy energiájú és átható képességű, hiszen a részecskéi sokkal gyorsabban mozognak, mint a Földön vagy bárhol a közelében föllépő hasonló részecskék, még a radioaktív anyagokból származókat is beleértve. A legnagyobb energiájú kozmikus részecskék alig valamivel haladnak lassabban a fénysebességnél (ez jelenti bármely mozgó test számára az abszolút felső határt).

A kozmikus sugárzás részecskéinek létezése szorosan összefügg a biológiai evolúcióval. Ezek a részecskék, lévén nagy energiájúak, mutációkat képesek okozni, sőt valóban okoznak is.

A Földet érő kozmikus részecskék mennyisége egyáltalán nem mérhető a Nap ibolyántúli sugárzásához, sem egy röntgenkészülék sugárzásához, sem a radioaktív anyagok közelében tapasztalható sugárzásához. Míg azonban a röntgensugár-forrásokat és a radioaktív anyagokat elkerülhetjük, sőt még a mindenütt jelenlevő ibolyántúli sugárzás elől is egyszerűen árnyékba húzódhatunk, addig a

kozmosz részecskesugárzást semmilyen kézenfekvő módon sem küszöbölhetjük ki.

Persze, le lehet menni egy bányába, jó mélyen a Föld felszíne alá, vagy lehet élni levegőbuborékban egy mély tó fenekén, esetleg körbe vehetjük magunkat pár méter vastagságban ólommal – de az élőlények óriási többsége nem köyeti és soha nem is követte ezen stratégiák egyikét sem.

Az élő szervezetek az évmilliárdok folyamán kevés nagyenergiájú elektromágneses sugárzással, radioaktív sugárzással vagy mutagén vegyszerrel találkoztak, viszont bárhol voltak is, éjjel-nappal bombázta őket a kozmikus sugárzás. A légkör és a víz, amely a Napból és általában az égboltról jövő szokásos sugárzás nagy részét elnyeli, nem állhatta útját a kozmikus sugárzás részecskéinek.

Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a kozmikus sugárzás részecskéi nem maradnak meg változatlanul abban az állapotban (az *elsődleges sugárzás* formájában), amelyben eredetileg a világűrben léteztek. Összeütköznek a földi légkör atomjaival és molekuláival, lelassulnak és elnyelődnek. Ennek során azonban nagyenergiájú részecskéket ütnek ki az atomokból és molekulákból (ez az úgynevezett *másodlagos sugárzás*). Ezek pedig valamilyen, még mindig erősen mutagén formában elérik a Föld felszínét, és mélyen behatolnak a talajba, illetve a vízbe.

Végül is oda lyukadunk ki, hogy a kozmikus sugárzás állandó részecskezápórának, amelyben az élet egész története folyamán fürdött, elég gyengének kellett lennie ahhoz, hogy lehetővé tegye az élőlények számára a nyugodt életet, ugyanakkor elég erősnek ahhoz, hogy a replikációs folyamat véletlen tökéletlenségei fölé emelje a mutációs arányt (még akkor is, ha ezekhez esetleg a kevésbé gyakori vagy könnyebben elkerülhető mutagén tényezőket is hozzászámítjuk).

A kozmikus sugárzás részecskéi ezek szerint bármi másnál jobban fölfokozták a mutációképződést, ami viszont lehetőséget adott a természetes kiválogatódás működésére, s az evolúciós folyamat így érte el tulajdonképpen sebességét. Létezésünket a kozmikus részecskéknek köszönhetjük, mivel nélkülük az evolúció sebessége mindmáig semmi bonyolultabbat nem eredményezett volna, mint néhány fegyverszerű, tengeri élőlényt.

De honnan ered a kozmikus sugárzás?

Mivel az égbolt minden irányából jön, nem tulajdonítható sem egyetlenegy, sem több, szétszórtan elhelyezkedő egyedi objektumnak. Az sem föltételezhető, hogy a kozmikus sugárzás minden egyes lökése egy-egy égi objektumból jön, amelyek valahol annak a pontnak a közelében vannak, ahonnan sugározni látszanak.

Az elektromágneses sugárzás gyakorlatilag egyenes vonalban terjed (kivéve a nagyon kis elhajlásokat, amikor egy-egy nagytömegű objektum közvetlen közelében halad el). Ez azt jelenti, hogy ha egy fénysugarat látunk, akkor forrása abba az irányba esik, amerre

éppen nézünk. Ha egy csillagot az általa kibocsátott fény révén látunk, akkor a fényét nézve pontosan a csillagra magára esik a tekintetünk. A fény egyenes vonalú terjedése annyira megszokott dolog, hogy ha azt mondaná valaki: „egy csillag ott van, ahol látjuk”, akkor ez teljességgel fölösleges szószaporításnak tünnék. Hiszen hogy is lehetne másképpen?

A többi fajta elektromágneses sugárzás is mind az égnek abból a pontjából ered, ahonnan jönni látjuk – ez ugyancsak magától értetődik.

Csak hogy az elektromosan töltött részecskék egyáltalán nem egyenes vonalban terjednek. Rájuk hatással van a mágneses tér, márpedig a Galaktika telis-tele van mágneses terekkel. Az összes csillagnak, nagyon sok bolygónak és a Galaktika egészének is megvan a sajátja. Ezért amikor a kozmikus részecske átrohan a csillagközi űrön, nagyon bonyolult görbe pályát ír le, mivel az összes mágneses térnek engedelmessé válik, amelyen csak áthalad.

Ahogy lerobog a Föld felszínére, az utazása végső szakaszában követett irány nem felel meg annak a pályának, amelyen tucatnyi fényévvvel odább haladt. Ugyanúgy, ahogy ha egy bizonyos vonal mentén közeledő madarat vagy denevért látunk, és a vonal visszafelé meghosszabbítva egy távoli fán végződik, akkor ez sem annak a jele, hogy a madár vagy denevér erről a fáról indult, hiszen repülése során tucatszor is szeszélyesen irányt változtathatott.

Minthogy a kozmikus sugárzás minden részecskéjének megvan a saját bonyolult pályája, nem csoda, hogy az ég minden irányából egyaránt érkeznek, s az is természetes, hogy egyiket sem tudjuk a forrásáig visszakövetni.

Annyit azonban tudunk, hogy a kozmikus sugárzás részecskéi iszonyú nagy energiával rendelkeznek, és jöjjenek bárhol, forrásuknak rendkívül forrongó állapotban kell lennie. Egy békés, nyugodt folyamatból nem származhatnak nagyenergiájú részecskék.

A Naprendszer legnyugtalanabb objektuma természetesen a Nap, annak felszínén pedig a napkitörés a leghevesebb esemény. Elég heves lehet egy napkitörés ahhoz, hogy kozmikus részecskék termelődjenek?

Ezt a kérdést igazából föl sem tették, de a válasz mindenesetre megjött, s valósággal rákényszerítette magát a tudósokra.

1942 februárjának vége felé a napkorong közepén jelent meg egy hatalmas napkitörés. Ez azt jelentette, hogy az anyagot egyenesen a Föld felé lövi ki. Ezután hamarosan egy viszonylag gyöngye részecskékből álló kozmikus sugárzási hullámot észleltek. Ez a Nap irányából közeledett, és föltételezhető volt, hogy a Nap a forrása, hiszen a rövidke Nap–Föld távolságon a gyors kozmikus részecskéknek sem idejük, sem alkalmuk nem volt arra, hogy haladási irányukat jelentősebben megváltoztassák.

Azóta számos „enyhe” kozmikus sugárzási hullám ért el bennün-

ket olyan nagy kiterjedésű napkitöréseket követően, amelyek a napkorong alkalmas helyén léptek föl.

Mai tudásunkkal ebben már semmi rejtélyes sincs. A napszél nem egyéb, mint kifelé zúdított atommagok, főleg hidrogén- és héliummagok áradata. Ezek a magok nagy energiával, több száz kilométeres másodpercenkénti sebességgel terjednek. A napkitörések a Nap felszínén végbemenő, különösen nagy energiájú események. Ezek olyan napszélökést hoznak létre, amelyben a részecskék még sokkal nagyobb sebességgel haladnak. Ha a kitörések elég nagy energiájúak, és a szél elég gyors, akkor a részecskék ugyanolyanok lesznek, mint a kozmikus sugárzás részecskéi.

A kozmikus sugárzás részecskéi ugyanolyan fajtájúak, mint amik a napszélben találhatók. Egyedül az különbözteti meg őket, hogy az előbbieknél nagyobb a sebességük és az energiájuk – éppúgy, ahogy a röntgensugarak is csak annyiban különböznek a fényhullámoktól, hogy kisebb a hullámhosszuk, illetve nagyobb az energiájuk.

A Nap azonban legfőképpen arra képes, hogy a legalacsonyabb energiatartományba eső kozmikus részecskékből bocsásson ki néha egy-egy hullámot. Ahhoz, hogy az egész Galaktikát nagyobb energiájú kozmikus sugárzással töltsék meg, sokkal hevesebb események szükségeltetnek, mint amilyen a középkorú, higgadt természetű Naptól telik.

A leghevesebb csillagesemények nyilván a szupernóva-robbanások, s joggal föltételezhető, hogy e robbanások mindegyike hatalmas erejű csillagszélrohamot bocsát ki minden irányba. Ezek lesznek a kozmikus sugárzás részecskéi.

Ezek a részecskék lassulás nélkül utaznak a majdnem üres csillagközi téren át. Sőt, miközben az útjukba kerülő mágneses tereknek engedelmessé válnak csavarmozgást végeznek, még föl is gyorsulhatnak, akár majdnem fénysebességig is. Minél nagyobb lesz az energiájuk, annál kevésbé térnek le egyenes pályájukról a mágneses terek hatására, végül pedig már semmi sem tarthatja vissza őket attól, hogy a galaxisból végleg kilépjenek a még üresebb galaxisközi térbe.

A kozmikus sugárzás részecskéi közül nem mindnek lesz ez a sorsa. Egy részük hosszú útja során más anyagdarabokkal ütközik össze, ami lehet a csillagközi tér egy atomja vagy porrészecskéje, de lehet egy csillag is, vagy valami a kettő között, mondjuk a Föld.

A Galaktika története folyamán fölrobbant szupernóvák összességé elegendő kozmikus részecskét bocsátott ki az űrbe ahhoz, hogy minden egyes másodpercben minden irányból jelentős mennyiségű ütközzék belőlük a Földbe. Persze, a mi galaxisunk szupernóvái által termelt kozmikus sugárzás bizonyos százaléka elhagyta a Galaktikát; ezt viszont pótolják azok a részecskék, amelyek máshonnan érkeztek hozzánk.

Így aztán a szupernóvák nem csupán a Föld és az élet nyersanyagát biztosították; nemcsak a hőt teremtették elő, amely megakadályozta a Naprendszer ösködének idő előtti besűrűsödését; nemcsak

azt a lökéshullámot idézték elő, amely végül lehetővé tette az összetömörödést; hanem ők szolgáltatják az evolúciós változások hajtóerejét is, amely az élet egyre bonyolultabb formáit, végül pedig emberi lényeket hozott létre a Földön.

A szupernóvák tehát titáni űrbeli olvasztótégelyek, gigászi üllők, amelyeken az anyag kikalapálódott, s amelyek termékei megteremtették az ahhoz szükséges környezetet, hogy az élet (legalább egyszer) kialakulhasson és fejlődhessen.

A jövő

A FÖLD MÁGNESES TERE

Mind ez idáig úgy beszéltünk a szupernóvákról, mint amiknek csakis az emberiség szempontjából kedvező hatásaik vannak. Elképzelhető-e azonban az is, hogy időnként így vagy úgy, de kárt okozzon nekünk a működésük? Netán még az is lehet, hogy bizonyos esetekben az emberi nem (sőt mindenféle élet) létét fenyegetik?

Nyilvánvaló, hogyha egy szupernóva a közelünkben (ez galaktikus méretekben értendő!) robban föl, ott gyilkos erősségű energiák szabadulnak el. Ha például a mi Napunk válna szupernóvává, nemcsak az egész földi élet érne véget percekben belül, hanem maga a földgolyó is elpárologna. Ha csupán nóva lenne a Napból, a Földet akkor is valószínűleg sterilizálná.

Ez azonban, mint korábban hangsúlyoztuk, nem történhet meg. A Nap ehhez nem elég nagy tömegű és nem is tagja egy szoros kettős rendszernek, ezért teljességgel kizárt, hogy akár most, akár a későbbiekben nóva vagy szupernóva legyen belőle. Útja végén majd vörös óriássá válik, aztán pedig fehér törpévé roppan össze, de mindaddig, amíg ez (öt-hatmilliárd év múlva) bekövetkezik, semmi olyasmi sem történhet a Nappal (hacsak valami olyan, teljesen valószínűtlen esemény nem jöhet közbe, mint egy másik csillaggal való összeütközés vagy majdnem-ütközés), ami általában az életet fenyegetné.

Árthat-e nekünk az, ha egy másik csillag robban föl? Azok közül a csillagok közül, amelyekről úgy gondoljuk, hogy képesek szupernóvává válni, még a legközelebbieket is több mint 100 parszeknyi messzeségben vannak. Ha holnap bármelyikük felrobbanna, akkor annak éppenséggel lehetnének káros hatásai, de az óriási távolság miatt nem valószínű, hogy ezek tényleg az egész emberiséget veszélyeztetnék.

Egyébként is: az eddigi legközelebbi szupernóvákat sem éreztük meg különösebben. Sem a Rák-ködöt eredményező szupernóva, sőt amennyire megállapítható, még a Vela szupernóva sem avatkozott be a földi életbe – márpedig ez annyira közel volt hozzánk valamikor a történelem előtti időkben, hogy pár napig ugyanolyan fényesen ragyogott, mint a telehold.

A távoli szupernóvák egyedüli közvetlen hatása ránk, amely elég erős ahhoz, hogy jelentős legyen, az általuk termelt kozmikus sugárzás. Nézzük hát még egyszer ezt a sugárzást!

A kozmikus sugárzás egészében véve meglepően nagy energiámmennyiséget szállít a Földre. Ez az energia nagyjából ugyanakkora, mint az égbolt valamennyi csillagából érkező teljes fényenergia, nem számítva bele természetesen a Napot. A kozmikus sugárzás részecskéinek száma persze sokkal kisebb, mint a csillagokból jövő fotonoké, csakhogy a kozmikus sugárzás egy-egy részecskéje jóval nagyobb energiával rendelkezik, mint egy-egy foton, és ez ellensúlyozza a kisebb számukat.

A kozmikus sugárzás részecskéi nagyjában-egészében egyenesen csapódnak be a Földre (eltekintve azoknak a viszonylag gyenge részecskéknél az esetenkénti, rövid ideig tartó áradatától, amelyek egy-egy különösen nagyenergiájú napkitörésből származnak). De tegyük föl, hogy ezek a becsapódások egy időre valamilyen okból jelentősen megszorodnak! Lehet ennek valamilyen káros hatása?

A válasz: igen!

A kozmikus sugárzás részecskéi mutációkat keltenek. Ezek ugyan szükségesek ahhoz, hogy az evolúció megfelelő sebességű lehessen, a legtöbbjük azonban ártalmas. Szerencsére az előnyös mutációk, a természetes kiválogatódásnak hála, rendes körülmények között tovább élnek és elterjednek, a hátrányos mutációk viszont kihalnak. Az utóbbiak megléte azonban még így is *genetikai terheltséget* jelent a faj számára: a népesség bizonyos százaléka viszonylag alkalmatlan lesz a túlélésre.

Mi a helyzet azonban akkor, ha a körülmények nem „rendesek”? Mi történik, ha a kozmikus sugárzás erőssége jóval a normális szint fölé emelkedik, és egy darabig ott is marad? Ekkor a mutációs arány is, a genetikai terheltség is növekedni fog. A genetikai terheltség annyira fölerősödhet, hogy a faj népessége rohamosan csökken; ezt a kisszámú előnyös mutáció sem tudja helyrehozni, és a faj kihal. Előfordul, hogy számos faj hal ki többé-kevésbé egyszerre.

De lehet-e bármi más oka a kozmikus sugárzás fölerősödésének azon kívül, hogy közeli szupernóvák tűnnek föl az űrben?

A különös a dologban az, hogy lehet. Sőt, igazság szerint szembe kell néznünk vele, hogy egy ilyen fölerősödés az elkövetkező pár ezer évben még akkor is elkerülhetetlenül be fog következni, ha egyetlen szupernóva sem járul hozzá a kozmikus sugárzás növekedéséhez. Ahhoz azonban, hogy ezt meg tudjuk magyarázni, egy kissé vissza kell lépünk.

A felénk tartó kozmikus sugárzás részecskéi nem mind érik el valóban a Földet. Bolygónk mágneses térrel rendelkezik. Erről 1600 óta van tudomásunk, amikor is *William Gilbert* (1544-1603) angol fizikus könyvében beszámolt azokról a kísérletekről, amelyeket egy mágneses anyagból készült gömbbel végzett. A gömb közelében

az iránytű pontosan úgy viselkedett, mint ahogy a Föld közelében szokott. Ebből az következett, hogy valamiképpen maga a Föld sem más, mint egy mágneses anyagból álló gömb.

Ha a Föld mágneses terében bejelöljük azokat a görbákat, amelyek érintője minden pontban a mágneses térerősség irányába mutat, akkor a *mágneses erővonalak* családjához jutunk. Ezek mindegyike a földfelszínnek ugyanazon a két pontján kezdődik, illetve végződik: az egyik pont az Antarktisz peremén van (ez a „déli mágneses sark”), a másik pedig Észak-Amerika északi szélén (ez az „északi mágneses sark”). Az erővonalak e kettő között húzódnak, kifelé hasasodó folytonos görbék, amelyek többé-kevésbé az észak-déli irányt követik, s legnagyobb magasságukat a mágneses sarkok között félúton érik el.

Az űrből a földfelszín felé rohanó, elektromosan töltött részecskék mindegyikének kereszteznie kell ezeket a mágneses erővonalakat, ami viszont energiát von el tőlük. A részecske energiát veszít, emiatt lelassul. Az az elektromosan töltött részecske, amelyik nem pontosan a Föld mágneses egyenlítőjét célozza meg, ráadásul el is térítődik: elhajlik a mágneses erővonalak mentén – északi irányban, ha a mágneses egyenlítőtől északra, déli irányban, ha attól délre esik.

Minél kisebb egy részecske energiája, annál inkább eltérítődik. Ha elég alacsony energiájú, akkor a mágneses erővonalak csapdába ejtik, és kénytelen lesz azok mentén végighaladni, hogy azután a mágneses sarkoknál vagy azok közelében lépjen be a légkörbe.

A kozmikus sugárzás részecskéi olyan nagy energiával rendelkeznek, hogy a Föld mágneses tere alig-alig téríti el őket. A részecskéknél azt a részét viszont, amelyek egyébként még éppen eltalálnák a földkorong szélét, eléggé el tudja téríteni ahhoz, hogy teljesen mellémenjenek. Valamilyen mértékben még azokat is eltéríti, amelyek egyenesebben közelednek. Emiatt a kozmikus sugárzás egy része, amely egyébként a szárazföldi életben gazdag trópusi és mérsékelt égövbe érkezne, végül is a sarkvidékre jut, amely szárazföldi életben szegényebb.

Ily módon a Föld mágneses tere némileg enyhíti azt a hatást, amit a kozmikus sugárzás gyakorol az életre. Ahhoz eléggé legyöngíti, hogy kevesebb kárt tudjon okozni, ahhoz viszont nem, hogy az evolúció szempontjából hasznos működését lehetetlenné tegye.

Minél gyöngébb a Föld mágneses tere, annál kevésbé bírja eltéríteni a részecskéket, s emiatt annál nagyobb lesz a kozmikus sugárzás intenzitása a földfelszínen, főképp az alacsonyabb szélességi körökön.

Márpedig a Föld mágneses tere nem marad mindig egyforma erős. Mióta a tudósok 1670-ben elkezdtek mérni, a mágneses térerősség mintegy 15 százalékkal csökkent. Ha ez a csökkenés tovább folytatódik, akkor körülbelül 4000-ben éri el a térerősség a nulla értéket.

De vajon folytatódik-e a térerősség csökkenése? Első pillantásra ez eléggé hihetetlen. Sokkal valószínűbb, hogy a térerősség ingadozik: mindaddig gyöngül, amíg el nem ér egy nem túl alacsony minimumot, majd erősödni kezd, amíg csak föl nem fut egy nem túlságo-

san magas maximum értékig, s ez a folyamat újra meg újra ismétlődik.

Eleinte úgy tűnt, hogy egyetlen módon tudjuk megmondani, mi is megy végbe valójában: várunk pár ezer évet, és közben folytatjuk a mágneses térerősség mérését; de aztán kiderült, hogy nem muszáj ehhez a megoldáshoz folyamodnunk.

A Föld kérgében számos olyan ásvány található, amelyek gyöngén mágnesesek. Amikor a vulkáni láva kihül és megszilárdul, ezek az ásványok a Föld mágneses erővonalainak megfelelően észak–déli fekvésű kristályokat alkotnak. Mi több, minden kristálynak megvan a maga északi pólusa, amelyik észak felé, illetve déli pólusa, amelyik dél felé mutat. (Hogy melyik az „északi” és melyik a „déli” pólus, azt egy közönséges mágnessel el lehet dönteni.)

1906-ban *Bernard Brunhes* (1869-1930) francia fizikus vulkáni kőzeteket tanulmányozott, és azt tapasztalta, hogy egyes kristályok mágnesezettsége épp ellenkező irányba mutat, mint a Föld jelenlegi mágneses tere: az északi pólusuk délre, a déli pólusuk északra néz. Ezt a fölfedezést eleinte figyelmen kívül hagyták, mint aminek semmi értelme sincs; idővel azonban további bizonyítékok gyűltek össze, s ekkor már sem kétségbe vonni, sem figyelmen kívül hagyni nem lehetett.

Miért „rossz” egyes kőzetek iránya? Nyilván azért, mert a Föld mágneses tere egyszer erre, máskor arra mutat. Azok a kőzetek, amelyek akkor hűltek és kristályosodtak ki, amikor a Föld mágneses tere az egyik irányba mutatott, maguk is ugyanezt az irányt jelzik. Amikor azonban a mágneses tér átfordul, nincs akkora ereje, hogy a kristályokat is irányuk megfordítására kényszerítse: a kőzetek most rossz irányba fognak nézni.

Az 1960-as években kezdték vizsgálni a tengerfenék mágnesezettségét. Az Atlanti-óceán medre például úgy érte el jelenlegi szélességét, hogy a Föld belsejéből az olvadt anyag az óceán középvonala mentén föltört egy hosszú, kanyargós repedésen át. A repedés közelében levő kőzetek a legújabbak, ezek szilárdultak meg legkésőbb. Ahogy bármelyik irányban kifelé haladunk, egyre öregebb kőzetekkel találkozunk. Ha a mágnesezettséget vizsgáljuk, akkor a repedéshez legközelebbi kőzetek a „jó”, a mágneses tér jelenlegi állapotának megfelelő irányba mutatnak. A repedéstől távolodva előbb „rossz” irányba mutatnak, azután megint „jó”, majd ismét „rossz” irányba. „Jó” és „rossz” sávok váltakoznak a repedés mindkét oldalán, s az egyik oldal mintegy tükröképe a másiknak.

Amikor megmérték ezeknek a kőzeteknek a korát, az derült ki, hogy a mágneses tér szabálytalan időközönként fordul meg. Néha csak ötvenezer, máskor viszont akár húszmillió év is eltelik két átfordulás között. Nyilvánvalóan az történik, hogy a mágneses tér erőssége periodikusan nullára csökken, majd a csökkenés tovább folytatódik „nulla alá” is – azaz megfordul az iránya, és az új

irányban válik egyre erősebbé. Azután megint nullára csökken, megint átfordul, és így tovább.

Mi az oka annak, hogy a mágneses térerősség ilyen szabálytalanul növekszik és csökken, s valahányszor áthalad a nulla értéken, mindannyiszor irányt változtat? Ezt még a tudósok sem tudják, azt azonban biztosra veszik, hogy pontosan ez megy végbe.

Úgy látszik, éppen most nézünk egy ilyen átfordulás elébe, amely – mint már említettem – a 4000. év körül fog bekövetkezni. Az ezt megelőző és követő néhány száz évben a mágneses tér annyira gyöngé lesz, hogy nem tudja majd jelentősebb mértékben eltéríteni a kozmikus sugárzás részecskéit.

Ahogy a mágneses tér növekszik, illetve csökken, úgy válik ritkábbá, illetve sűrűbbé a kozmikus sugárzást alkotó részecskék becsapódása. A kozmikus sugárzás akkor minimális, amikor a mágneses tér a legerősebb, és akkor éri el a maximumát, amikor a mágneses tér nulla intenzitásúvá válik.

Amikor a mágneses térerősség nulla, a kozmikus sugárzás pedig maximális, akkor a mutációs arány is, a genetikai terheltség is maximálissá válik. Ez az az időszak, amikor a fajok kihalásának legnagyobb a valószínűsége.

A „NAGY KIHALÁSOK”

Fajok persze a földi élet egész története folyamán haltak ki, de azért ez nem akárhogyan ment végbe. A fosszilis maradványok tanulmányozásából a paleontológusoknak arra kellett következtetniük, hogy voltak időszakok, amikor ez a kipusztulás rendkívül nagy arányú volt, sőt bizonyos korokban viszonylag rövid idő alatt az élő fajok többsége szűnt meg létezni.

Ezeket az időszakokat nevezik olykor úgy, meglehetősen drámaian, hogy „nagy kihalások”. Ezek legnevezetesebbike mintegy hatvanöt millió évvel ezelőtt zajlott le. Ekkor tűntek el, sok más fajjal együtt, a Földet mindaddig uraló óriáshüllők, közöttük az a rengeteg lény, amelyeket *dinoszauruszoknak* szoktunk hívni.

Lehet, hogy ezek a „nagy kihalások” egybeesnek a mágneses tér nulla erősségű időszakaival? Netán 4000-ben is egy ilyen yár ránk, ami az emberi fajt fogja, nem is olyan soká, eltörölni a Föld színéről?

Ettől semmi szín alatt nem kell tartanunk. Nagyon messzire ugyan nem tudjuk visszakövetni időben a mágneses tér átfordulásait, de annyit azért tudunk, hogy ez az utóbbi néhány tízmillió évben jó párszor előfordult, és ezt nem követte szükségképpen a kihalások számának különösebb megugrása. A genetikai terheltség várhatóan kétezer év múlva sem fog katasztrófát okozni.

S ez nem is olyan meglepő. A Föld mágneses tere egyébként sem valami erős, a kozmikus sugárzás részecskéi pedig olyan óriási energiával rendelkeznek, hogy nem is térítődnek el túlságosan. Ezért

ahogy a mágneses térerősség csökken, a kozmikus részecskék ugyan erősebben bombáznak bennünket, ez azonban nem jelent nagymérvű felerősödést – egyszerűen azért, mert a sugárzás akkor sem veszít igazán sokat az intenzitásából, amikor a mágneses térerősség megnő.

De mi a helyzet akkor, ha a kozmikus sugárzás erőssége a Föld mágneses terétől függetlenül nő meg? Mi történik, ha egy szupernóva robban föl a közelünkben? Ilyenkor egy ideig csak úgy záporoznak a Földre a kozmikus sugárzás részecskéi, ez pedig magarázatot adhat a sok kihalásra.

Képzeljük el, hogy egy nagy szupernóva-robbanás megy végbe tőlünk tíz parszeknél nagyobb távolságból! Megeshet, hogy egy

darabig a Nap fényének $6+0$ -ad részével ragyog, és így jóval fénye-

sebb, mint bármi más az égen, még a 'Holdat is beleértve. Ha a Földnek a Nappal ellentétes oldalára esik, akkor az éjszakát borongós hasonlívá változtatja. De akárhol legyen is az égen, egy időre biztosan kellemetlenül fölmelegíti a Földet.

De ami fontosabb: a kozmikus sugárzás erőssége a mostaninak százszorosára vagy akár ezerszeresére ugrana, és évekig úgy maradna. Ez mindenféle kellemetlen következménnyel járna. Az ózonréteg elvékonyodna, így több ibolyántúli sugárzás érné a felszínt, ez pedig éppoly végzetes lenne az életre, mint maga a kozmikus részecskesugárzás. A légköri nitrogén és oxigén részben egyesülne, márpedig a nagy magasságban képződő nitrogénoxid elnyeli a látható fény egy részét. Ezért a kezdeti növekedés után a hőmérséklet lecsökkenne, a csapadékszint ugyancsak. És persze nagyban megemelkedne a mutációs arány, illetve a genetikai terheltség.

Ha mindez éppen akkor következik be, amikor a Föld mágneses tere nulla vagy akörül van, a hatások némiképp még föl is erősödnek, az ártalmak úgyszintén. Lehet, hogy a „nagy kihalásokat” egy-egy közeli szupernóvának és a mágneses tér időleges megszűnésének az egybeesése idézte elő?

Tíz parszekes körzeten belül egyetlen olyan csillag sincs, amelyből szupernóva válhatnék, így ez első pillantásra képtelen ötletnek tűnik. A Nap azonban, ahogy Galaktikánk összes többi csillaga is, mozog. Égi útjuk során a csillagok körbekerülik a Galaktika középpontját, de nem olyan pontos egyöntetűséggel mozognak, mint egy tánckar tagjai. Azok, amelyek távolabb vannak a középponttól, lassabban haladnak, mint azok, amelyek közelebb esnek hozzá. Némelyikük pályája (mint a Napé is) megközelítően kör alakú, másoké viszont erősen elliptikus. Van, amelyik a Tejútrendszer fő síkjában helyezkedik el, s van, amelyiknek pályája jókora szöveget zár be vele.

Ezért aztán megeshet, hogy egy csillag közel kerül egy másikhoz, aztán eltávolodik tőle, hogy aztán egy újabbat közelítsen meg, majd attól is eltávolodjék – s ez minduntalan megismétlődik, yalahányszor megkerüli a Galaktika középpontját. Annak, hogy tényleg összeütközzenek, rendkívül kicsi a valószínűsége, de hogy két csillag tíz

parszeknyire megközelítse egymást, az nem mély ritkaságszámba. Az Alfa Centauritól 1,3 parszekre, a Szíriusztól pedig 2,7 parszekre vagyunk. Ez a távolság nem volt mindig ekkora, és a jövőben sem marad mindenkor ugyanennyi.

Ezek szerint lehetséges, hogy a Nap hosszú pályafutása során időről időre éppen akkor került egy-egy csillag közvetlen közelébe, amikor az szupernóvává vált, és hogy ez időről időre a jövőben is bekövetkezhet? Magyarázhatjuk-e ezzel a „nagy kihalásokat”, mondjuk a dinoszauruszok kipusztulását?

Ez a föltevés az 1970-es évek végén meglehetősen népszerűségnek örvendett a tudósok körében.

1980-ban azonban *Walter Alvarez* (1911–) amerikai fizikus fölfedezte, hogy egy bizonyos hatvanötmillió éves kőzetréteg meglepően nagy mennyiségben tartalmazza az iridium nevű ritkafémet. Föltevése szerint valamikor hatvanötmillió évvel ezelőtt a Földet egy nagyobbacska kisbolygó (görög eredetű nevén: *aszteroida*) találta telibe, ami olyan sok port lökött ki a sztratoszférába, hogy hosszú időre teljesen elzárta bolygónkat a napfény elől. Ez idézte elő a „nagy kihalást”, a dinoszauruszok pusztulását. A porfelhő végül leülepedett a Föld felszínére, benne az iridium finom porával, amiben az eredeti kisbolygó viszonylag gazdag volt.

Azóta nagy jelentőségű adatok váltak ismertté, amelyek alátámasztják ezt a föltételezést. Mi több, 1983-ban az is bebizonyosodott, hogy a „nagy kihalások” meglepő szabályossággal, minden 26-28 millió évben következnek be. A csillagászoknak fontolóra kellett venniük, milyen tényezők tehetők felelőssé egy ilyen hosszú távú periodicitásért.

Így például azon spekulálnak, hátha van a Napnak egy távoli kísérőtársa, amely nem elég nagy ahhoz, hogy égboltunkon csillagként világítson, és amely huszónhétmillió éves keringése egy pontján annyira közel kerül a Naphoz, hogy áthalad azon a százmilliárdnyi üstökösből álló felhőn, amely valószínűleg messze a Plutó pályáján kívül halad. Ez a kísérő gravitációs vonzása révén az üstökösök százazereit térítheti a Naprendszer belsejébe vezető pályára. Egyik-másikuk biztosan összeütközik a Földdel, és akkora pusztítást idéz elő, ami fajok tömeges eltűnéséhez vezet.

A legutóbbi „nagy kihalás” körülbelül tizenegymillió évvel ezelőtt következett be, és ha az üstökös-hatás föltételezése helytálló, akkor a következő mostantól úgy tizenhatmillió év múlva várható. Egyelőre tehát nem kell nyugtalanodnunk miatta.

A szupernóvák ezzel (mindaddig, amíg további bizonyítékok és értelmezések nem kerülnek elő) föl lettek mentve a „nagy kihalásokért” viselt felelősség alól. Mindazonáltal annak továbbra is fönnáll a lehetősége, hogy esetenként egy-egy, viszonylag közeli szupernóva szolgáltatson akkora kozmikus sugárzást, ami olyan kihalásokat is képes előidézni, melyek egyébként nem következtek volna be.

A VILÁGŰR

A jövőben olyan sajátos föltételekre számíthatunk, amelyek mellett sokkal inkább kell majd törődnünk a kozmikus sugárzással, mint most.

Gondoljunk például az űrutazásra! Már többen megfordultak a közeli világűrben, mindenén, még a magaslégtör legkritikusabb foszlányain is túl. Voltak, akik egészen a Holdig merészkedtek.

A Föld körül keringő űrhajós kívül jár a légkör védelmet biztosító rétegein, de önmaga és a Napból, illetve más, távolabbi űrbéli forrásokból özönlő kozmikus sugárzás között még ott tudhatja a bolygó mágneses terét.

Mindeddig egyetlen *kozmonaután* (ez a görög szóösszetétel az „űrhajós” pontos megfelelője) sem mutatkozott észrevehető károsodás amiatt, hogy űrbéli körülményeknek volt kitéve. Még azok a szovjet űrhajósok is remekül kibírták, akik nyolc hónapnál tovább maradtak egyfolytában a pályán. (Akad közöttük, aki két különböző szolgálati útja során egy évet is eltöltött a légkör fölött.)

Azok az űrhajósok, akik a Holdra és visszautaztak, nemcsak a légkört hagyták el, hanem a Föld mágneses terét is. Márpedig a Hold maga ezek közül egyikkel sem rendelkezik érzékelhető mértékben. Ezeket az űrutazókat így hat napon keresztül bombázta teljes erővel a kozmikus sugárzás, azonban így sem szenvedtek semmiféle károsodást.

Csak hogy eljön az idő, amikor egyesek még hosszabb ideig lesznek kitéve efféle hatásoknak. Meglehet, az-elkövetkezőkben űrhajók indulnak majd legénységgel a fedélzetükön a Marsra, sőt még távolabbra. Ezek utasai már nem napokig, hanem hónapokig vagy akár évekig is ki lesznek téve a kozmikus sugárzás bombázásának.

Sőt, űrbéli települések létesítése sem lehetetlen, amelyeken emberek ezrei élhetnek korlátlan ideig. Itt már nem évekről, hanem egy egész életről, sőt több generációról van szó. Lesz idő, amikor gyermekek fogannak, születnek és nőnek föl a világűrben. Megnövekszik-e majd a mutációk aránya a kozmikus sugárözön hatására? Szaporodnak-e a születési rendellenességek? Megnehezíti vagy egyenesen lehetetlenné teszi-e a fokozódó genetikai terheltség az űrbéli életet?

Amennyiben az űrvárosok elég nagyméretűek, a kozmikus sugárzás elleni védelmük, legalábbis részben, sok kilométer vastag légkör és bolygóméretű mágneses tér híján is megoldható.

Ezeket a településeket valószínűleg a Holdon bányászott fémből és üvegből fogják megépíteni. A talajt szétmorzsolta, az űrváros belső felületén szétterített holdkőzetek alkotják majd; ezt a centrifugális erő szögezi a helyéhez, ugyanis az egész forogni fog. Ezen a talajon mezőgazdasági tevékenységet folytatnak, de olyan vastagra is készíthető, hogy elnyelje a kozmikus sugárzás részecskéinek nagy részét.

Igazán hosszú utazásokhoz az űrben megépített és útnak indított

hatalmas hajókat fognak használni, amelyeket úgy lehet megszerkeszteni, hogy mindegyik önmagában egy-egy kis világ legyen. Ezeknél a hajótestet belülről szintén talajjal lehet borítani, részint azért, hogy saját élelmiszerüket meg tudják termelni, részint viszont azért, hogy elnyelje a kozmikus sugárzást.

Lesznek azonban olyan időszakok is, amikor a kozmikus sugárzás veszélye átmenetileg megnövekszik. Olykor-olykor egy óriási napkitörés kozmikus részecskék valóságos orkánját idézi elő, amely végigsöpör az űrhajókon és az űrvárosokon. Meglehet, egy-egy ilyen sugárorkán nem tart túl soká, és gyöngébb részecskéket ad, mint az átlagos kozmikus sugárzás. A talajréteg kétségekívül elegendő védelmet biztosít.

A váratlan szupernóva-robbanások ugyancsak fokozzák majd a kozmikus sugáráramot. Ez ugyan jóval ritkábban következik be, viszont sokkal nagyobb energiájú részecskéket szolgáltat sokkal hosszabb ideig. Ezek a szupernóvák azonban általában elég nagy távolságban lesznek ahhoz, hogy ne jelentsenek túl nagy veszélyt.

Természetesen mindig elképzelhető az események olyan kombinációja, amely tragédiához vezet. Ha eljutunk az űrvárosokhoz és az űrközpontú társadalomhoz, akkor minden pillanatban szükségképpen lesznek olyanok, akik éppen rövid utazást tesznek kicsi és védelem nélküli űrkompokon egyik városból a másikba, vagy akik az űrben dolgoznak, mindössze akkora védelem mellett, amekkorát egy űrruha jelent. Ha a kozmikus részecskék bombázása hirtelen-váratlan fölerősödik akár a Nap, akár egy szupernóva miatt, az súlyos következményekkel járhat, emberi életet rövidíthet meg komoly mértékben vagy olthat ki végképp. Ezt mégis, mint elkerülhetetlen balesetet, valószínűleg számításán kívül kell majd hagynunk, és nem engedhetjük, hogy meggátolja az emberiség űrbéli fejlődését – csakúgy, ahogy a Földön is hozzáedződünk, mondjuk, a hóvihár vagy a villámcsapás okozta életveszély lehetőségéhez.

Egyszer talán annyira kiismerjük a szupernóvákat, hogy bármely pillanatban képesek leszünk közelítő pontossággal megjósolni a készülő robbanást. Sőt, remélhetőleg megbízható Nap-prognózisokat is tudunk majd készíteni, amelyek előre jelzik az erős napkitöréseket. Egy-egy ilyennek az időtartamára a védteleneket, amennyire csak lehet, egyszerűen visszahívják az űrből: az emberek megvárják a legveszélyesebb időszak elmúltát, és csak azután térnek ismét vissza.

A SORON. LEVŐ SZUPERNOVA

Azokra, akik a Föld biztonságot adó felszínén tartózkodnak, nem valószínű, hogy egy szupernóva halálos veszélyt jelentsen. Ha a tulajdon Galaktikánkban jelenik meg, és nem takarják el porfelhők, pompás látványt nyújt az éjszakai égbolton. Egy nem túl közeli

szupernóva is sokkal fényesebb, mint az ég bármely csillaga vagy

bolygója, sőt vetekedhet (ahogy az 1006. évi szupernóva a Farkas csillagképben) magával a Holddal is. A fényes szupernóva egy ideig természetesen még nappal is látszani fog.

1604 óta azonban egyetlen szupernóva sem volt látható szabad szemmel. Akár becsapottnak is érezhetjük magunkat: a szupernóva-képződés gyakoriságát ismerve joggal vártuk volna, hogy az azóta eltelt négyszáz év folyamán több is föllángoljon.

Mi csak egy, az égeri erősen, bárha csak időlegesen fölragyogó fénypont látványával lettünk szegényebbek, a csillagászok viszont jóval többtől estek el. Ha modern műszerek irányulhattak volna akár egyetlen fényes szupernóva-kitörésre, akkor pár nap alatt többet tudhattak volna meg a szupernóvákról, egyáltalában a csillagok fejlődéséről, mint a legutóbbi szabad szemmel látható szupernóva óta eltelt több mint négy évszázad folyamán összesen.

Meddig lesz még ilyen szűkmarkú velünk a mennybolt? Van esélyünk arra, hogy a közeljövőben egy ragyogó szupernóvát lássunk?

Van bizony. Sőt, még logikus becsléseket is tehetünk arra nézve, hogy merről fog föltűnni.

Először is, ha egy szupernóva valamikor a következő néhány évben fog fölvilanni, akkor annak most az összeroppanás előtti utolsó stádiumban kell lennie. Ez azt jelenti, hogy vörös óriásról van szó. A robbanás csak akkor lesz látványos, ha yiszonylag közel van hozzánk. Ezért ha a következő szupernóva esélyeseit keressük, mindenekelőtt a közeli vörös óriások közt kell körülnéznünk.

A hozzánk legközelebb eső ilyen a Pegazus csillagképbeli Scheat. Ez alig ötven parszekre van tőlünk, de az átmérője körülbelül csak százöttszerese a Napénak. Vörös óriásnak elég kicsi, és ha ez a végleges mérete, akkor valószínűleg nincs is nagyobb tömege, mint a Napnak, és sosem lesz belőle szupernóva. Ha pedig még tágul, akkor viszont hosszú út áll előtte a fölrobbanásig, és mi egymillió évig vagy annál is tovább várhatunk a szupernóvánkra.

A Mira, más néven Omikron Ceti hetven parszeknyire van, átmérője viszont négyszázhuszszorosa a Napénak, és a tömege is határozottan nagyobb. Ráadásul szabálytalanul lüktet, ami annak lehet a jele, hogy a végső stádiumba érkezett, és egyre instabilabbá válik. Ha ebből a jelöltrebből lesz a következő szupernóva, akkor azt úgy nézhetjük majd végig a Földről, mint mikor egy színházi előadást az első sorból látunk.

Három olyan vörös óriás van yiszonylag közel, mintegy 150 parszeknyire, amelyek a Miránál is nagyobb tömegűek. Ezek egyike a Herkulesben a Ras-algethi, amelynek átmérője 500-szor, másika a Skorpióban az Antaresz, amelynek átmérője 640-szer múlja fölül a Napét. Ennél is nagyobb a Betelgeuze az Orionban, amely, akárcsak a Mira, szintén lüktet. A tömege valahol tizenöt és harminc naptömeg között van.

A Betelgeuze valóban sok szempontból közvetlenül szupernóva

előtti állapotban van. Iszonyú erejű csillagszele évenként annyi anyagot fúj ki, ami egyenlő a Nap tömegének 1001000-ed részével.

Úgy is mondhatjuk, másfél naponként veszít a Hold tömegének megfelelő anyagmennyiséget.

Ilyen óriási csillagszél mellett nem meglepő, hogy a Betelgeuze-t gázhéj veszi körül, amely a legújabb vizsgálatok szerint abnormálisan kevés szén-atommagot tartalmaz. Ez a szénhiány föltehetőleg magas nitrogéntartalommal jár együtt, márpedig egyes szupernóva-maradványokat nitrogénben gazdagnak találtak. Akkor viszont ha egy vörös óriás külső rétege sok nitrogént tartalmaz, ez nyilván annak a jele, hogy már nincs túl messze a szupernóva-robbanástól.

Persze, egy csillagászati történés esetében ez a „nincs túl messze” nem jelenti azt, hogy nap mint nap várakozva kellene az eget lesnünk. Egy csillag életében a „rögtön” nyugodtan jelenthet ezer vagy akár tízezer évet is. A Betelgeuze akár holnap fölrobbanhat (pontosabban: fölrobbanhatott közel ötszáz évvel ezelőtt, mert a robbanás fénye ez esetben érne el hozzánk holnap), de lehet, hogy még több ezer évig sem robban – itt nem lehet biztosra menni.

Magától értetődik, hogy ha a csillagászok csak egyetlen, bármiféle közeli szupernóvát is látnának, akkor már eleget tudhatnának meg az efféle robbanások feltételeiről ahhoz, hogy a következőnek az időpontját aztán sokkal pontosabban meg lehessen határozni.

A Betelgeuze, ha fölrobban, valószínűleg sokkal fényesebbnek bizonyul majd, mint bármely más, az emberiség földi létezése során megjelent szupernóva, hiszen az összes korábbinál közelebb van. Például tizedannyira sincs, mint az 1054. évi nagy szupernóva volt.

Tetőpontján a Betelgeuze szupernóva a telihold fényességével vetekedne. Amíg azonban a telihold fénye egy jókora korongon oszlik el, úgyhogy egyetlen csillagnyi nagyságú darabkája sem fénylik túl erősen, s ezért nyugodtan nézhetjük, ameddig csak akarjuk, addig a Betelgeuze szupernóva az összes fényét egyetlen piciny pontból árasztaná felénk. Ebben az esetben nem lenne bölcs dolog elragadtatva, hosszan bámulni rá, mert károsítaná a retinánkat.

A Betelgeuze szupernóva, különösen ha olyankor robbanna föl, amikor bolygónk mágneses tere nulla körül jár, akkora kozmikus sugárzási hullámot keltene, ami sokféle élőlény genetikai terheltségét megnövelné, s esetleg egyes fajok kihalásához is vezetne. Ha a robbanás történetesen abban az időszakban következik be, amikor az emberiség már kilépett a Föld felszínéről, de még nem látta el megfelelő védelemmel a már megépített különböző szerkezeteket, akkor ez az űrben tartózkodó emberek komoly károsodásához vezethet, s ez ellen pillanatnyilag semmit sem tudunk tenni.

Végtére is lehet, hogy nem a Betelgeuze lesz az a csillag, amely a legközelebbi látható szupernóvát produkálja. Néhány csillagász meg van róla győződve, hogy a legesélyesebb jelölt az Éta Carinae, ame-

lyet elsőként – mint korábban említettem – John Herschel figyelt meg.

Az Éta Carinae-nak még a Betelgeuze-nél is erősebb csillagszele van, ezért az őt körülölelő gázhéj is sűrűbb. Ez a gázhéj elnyeli a csillag által kisugárzott fény egy részét, ezért az halványabb, mint amilyen egyébként lenne. A fényt a héj végül a legkisebb energiataralmú infravörös sugárzás formájában bocsátja ki. Az összenergiának azonban nem szabad csökkennie, ezért aztán az infravörös sugárzás mennyiségének nagyon nagyra kell lennie, hogy a kvantumonkénti kisebb energiát ellensúlyozza. És tényleg, az Eta Carinae-ból több infravörös sugárzást kapunk, mint bármely más, a Naprendszeren kívüli égi objektumból.

Ez a gázhéj továbbá szénben szegény, nitrogénben viszont gazdag. Végül pedig az Éta Carinae még kevésbé stabilis, mint a Betelgeuze. A múltban viszonylag enyhe robbanásokon ment keresztül, amelyek azért, ha kis időre is, az égbolt második legfényesebb csillagává tudták tenni. Csak a Szíriusz tett túl rajta.

Csakhogy a Szíriusz 2,7 parszekre van tőlünk, az Éta Carinae távolsága viszont 2750 parszek. Tekintye, hogy az Éta Carinae ezerszer távolabb van, a Szíriusszal vetekvő fényesség az ő esetében azt jelenti, hogy luminozitása egy ideig milliószorosan kellett hogy fölülmúlja a Szíriuszét.

Lehetséges, hogy nem a Betelgeuze, hanem az Éta Carinae az, amelyik inkább a végét járja, de ha az Eta Carinae robban föl, az nem lesz olyan mutató látvány. Ez ugyanis hozzávetőleg hússzor olyan messze van, mint a Betelgeuze, úgyhogy az Éta Carinae szu-

pernova alig több mint 1/10-ig olyan fényes lenne, mint a Betelgeuze

szupernóva. Sőt, mivel messze lent a déli égbolton helyezkedik el, a fölvilágítás Európából vagy az Egyesült Államok nagy részéből nem is lenne látható.

Viszont az Eta Carinae szupernóvának kevésbé lenne módja rombolni, mint a Betelgeuze szupernóvának, s azért ez is megfontolandó.

Ugye látható, milyen messzire jutottunk Arisztotelész békés, változatlan égboltjától! Most már tudjuk, hogy ez az ég hevesen változik, itt is, ott is hatalmas energiájú eseményeket rejt. Tudjuk, hogy az afféle nagyenergiájú eseményekről, mint amilyen egy csillag fölrobbanása, olykor még szabad szemmel is meggyőződhetünk, és hogy az ilyen események ránk, Föld-lakókra sem veszélytelenek.

Mégis, sokkal inkább van okunk örülni, mintsem panaszkodni. Más csillagok fölrobbanása és halála nélkül a mi Napunk sosem lehetett volna az, ami; enélkül a Föld sem nyerhette volna el a mai formáját; és mi sem lehetnénk itt, valamennyi élőlénytársunkkal egyetemben, hogy élvezzük bolygónkat, a Napot, és (ami az embereket – köztük téged, kedves Olvasóm! – illeti) azt a csodálatos érzést, amely akkor tölt el bennünket, ha egy este rajta felejtjük tekintetünket az éjszakai égbolton szertehintett Galaktikán.

Utó szó

SZUPERNOVA A NAGY MAGELLÁN-FELHŐBEN

Miközben az Éta Carinae és a Betelgeuze változatlanul nyugodt fényével látható az éjszakai égbolton, közel 400 év után újra szabad szemmel is észlelhető szupernóvát tanulmányozhatnak a csillagászok – már legalábbis azok, akiknek lehetőségük van megfigyeléseiket a déli féltekéről végezni.

Az új szupernóva a Nagy Magellán-felhőben villant föl, ami a mi Tejútrendszerünk kísérő galaxisa, és tőlünk mintegy 55 000 parszeknyire fekszik. A jelenség így természetesen nem annyira látványos, mintha a mindössze 2,7 parszekra levő Szíriusz, vagy akár a 2750 parszek távolságban fénylő Eta Carinae robbant volna, de föltehetőleg így is új fejezetet nyit a szupernóva-kutatás történetében.

Foglaljuk össze röviden, jegyzőkönyvszerűen az új szupernóva fölfedezéséhez vezető eseményeket!

Február 22. 9 óra 36 perc	Az ausztráliai Aston University műholdkövető kamerájának felvételén még semmi rendkívüli nem látszik.
február 23. 1 óra 10 perc	Az ESO (European Southern Observatory) LaSilla-i obszervatóriumában a Nagy Magellánfelhőről készült felvételen még mindig nincs jele a közelgő szupernóva-robbanásnak.
1 óra 56 perc	Az amerikaiaknak az ESO-hoz hasonló, szintén chilei obszervatóriumában (Las Campanas) készült felvételen a későbbi szupernóva, a Sanduleak-69202 jelű csillag még mindig tartja megszokott 12 magnitúdós fénysebességét.

2 óra 53 perc	A Mont Blanc alagútban levő olasz–szovjet 90 tonnás szcintillációs detektor 7 másodperc időtartamon belül 5 darab neutrínót észlel. (A berendezés a 6-10 MeV energiatartományban érzékeny.)	4 óra 48 perc	Ugyanitt Oscar Duhalde night assistant teázni indul az egyik teleszkóptól, és az égre pillantva észreveszi a szupernóvát.
7 óra 35 perc	Újabb (?) neutrínó-zápor éri el a Földet, a különböző földrészekben telepített neutrínó-távcsövek egyaránt érzékelik. Kamioka (egy japán cinkbányában levő berendezés). A 2140 tonnás neutrínódetektor 13 másodperc alatt tizenegy neutrínót (illetve antineutrínót) észlel, ebből kilenc darabot 2 másodpercen belül. Ezeknek egy része neutrínó, így lehetőség nyílik iránymérésre is. (Az antineutrínók esetében nem tudnak irányt mérni.) A mért irány a Nagy Magellán-felhőre mutat, legfeljebb 15°-os hibával. Ez a berendezés a 9-35 MeV energiatartományban érzékeny. IMB (az /rwine–Michigan–Brookhaven egyetemek neutrínótávcsöve Ohio államban egy sóbányában). Ez a 20-40 MeV energiatartományban érzékeny berendezés nyolc beütést észlel 6 másodperc alatt. (Ebből ötöt 2 másodpercen belül.) A Mont Blanc-berendezés szintén észlel két beütést. Egy, a Kaukázusban (Baksan) levő szovjet neutrínótávcső is észlel három beütést.	5 óra 32 perc	Shelton az előhívott felvételen szintén megtalálja a szupernóvát.
		8 óra 32 perc	Egy Új-Zéland-i amatőr csillagász, Albert Jones – függetlenül az említettektől – fölfedezi a szupernóvát, és fényességét 5,1 magnitúóra becsüli.
		9 óra 36 perc	A Nemzetközi Csillagászati Unió táyiratilag riadóztatja a jelentősebb obszervatóriumokat az új szupernóva (amely időközben az 1987 A nevet kapta) megfigyelésére.
		11 óra 03 perc	A szupernóva fényessége 4,8 magnitúdó. 17 óra 17 perc A fényesség eléri a 4,4 magnitúdós értéket.
		19 óra 12 perc	A szupernóvára irányítják az IUE (International Ultraviolet Explorer) mesterséges holdat.
		február 25. 1 óra 12 perc	A La Sillán készült újabb felvételen már maximum-fényességgel ragyog az új szupernóva. Ez a fényesség azután még tovább növekedett, de most már csak lassan.
február 24. 0 óra 29	Ian Shelton amerikai csillagász háromórás expo perc ziciós idejű felvételt kezd a Nagy Magellánfelhőről a Las Campanas obszervatóriumban.		

Az 1987 A szupernóva elsősorban a neutrínó-csillagászat szempontjából számít jelentős eseménynek. Ez az első konkrét égi jelenség, amit a neutrínócsillagászat eszközeivel észleltek. A mérések és az azokat kiegészítő számítások szerint összesen 10^{58} neutrínó keletkezett a szupernóva-robbanás folyamán. Ez a neutrínó-zápor mintegy 160 000 évig haladt a világűrben, mire elérte Földünket 1987. február 23-án; és még itt, ilyen óriási távolságban is mintegy 10^{10} neutrínó haladt át a Nagy Magellán-felhő irányára merőleges minden négyzetcentiméteren! (A számítások szerint ez a neutrínó-zápor körülbelül minden néhány ezredik ember testének anyagával lépett valamilyen kölcsönhatásba.)

Mivel a neutrínók igen nehezen lépnek kölcsönhatásba, megfigyelésükre (hogy a zavaró jeleket kiküszöbölhessék) föld alatti hatalmas tisztítottvíz-tartályok szolgálnak. A Kamioka berendezés körülbelül 1000 méter mélyen leyő 2140 tonnányi vizét 948 darab, az IMB 5000 tonnáját pedig 2048 darab fotoelektromos cella figyeli. (Ez utóbbiakból, sajnos, épp a kérdéses időpontban meghibásodás miatt 512 üzemképtelen volt.) A neutrínók detektálása azon alapszik, hogy a tartályban leyő anyaggal kölcsönhatásba lépve olyan elektront (vagy pozitront) keltenek, amely az ott (a vízben) érvényes fénysebességnél gyorsabban indul, majd néhány centiméternyi utat megtéve lefékeződik, miközben a mozgásának irányába fényt sugároz ki. (Ez az úgynevezett Cserenkov-sugárzás.)

Mivel az elektron-antineutrínó egy protonnal lép kölcsönhatásba, és ekkor egy neutron és egy (világító) pozitron keletkezik, és ezeknek együttes mozgási iránya jellemző a neutrínó mozgási irányára, ezért a megfigyelhető pozitronnak (amelynek tömege a neutronéhoz képest igen kicsi) a mozgási iránya önmagában nem lesz jellemző a neutrínó mozgási irányára. Más a helyzet az elektron-neutrínóval. Ez egy elektronnal szóródhat, és azt természetesen az ellenkező irányba löki, mint amerről jött; ezáltal lehetőség nyílik az érkező neutrínó-sugárzás irányának meghatározására.

A február 23-i neutrínó-észleléssel kapcsolatban két fontos probléma vár tisztázásra:

1. Miért tartott a megfigyelt neutrínó-zápor ilyen hosszú ideig (körülbelül tíz másodpercig)? Elméletileg ugyanis a csillag belsejének összeroppanása (ekkor keletkeznek a neutrínók) maximum egy-két másodperc alatt lezajlik.

2. Miért volt (illetve volt-e egyáltalában) két különböző, négy és fél órás időkülönbséggel megfigyelt neutrínó-zápor?

Kezdjük az utóbbi kérdéssel! Erre a legegyszerűbb válasz az, hogy az első, a Mont Blanc-mérés nem reális, pusztán mérési hiba. Mások

szerint (tekintettel arra, hogy ez a berendezés általában havonta csak egy-két neutrínót észlel) ez nem lehetséges, és a megoldást abban az irányban kell keresni, amit Wolfgang Hillebrandt, a müncheni MaxPlanck-Institut für Astronomie munkatársa javasolt. Szerinte a szóban forgó csillag először összeroppan neutroncsillaggá, majd négy és fél óra múlva ez a neutroncsillag is összeroppan, és helyén egy fekete lyuk keletkezett. Hogy az első neutrínó-záport csak a Mont Blanc-berendezés észlelte, arra pedig az lenne a magyarázat, hogy az első összeroppanáskor keletkezett neutrínók viszonylag kisebb energiájúak voltak (10 MeV alatt), és ebben a tartományban csak ez a berendezés érzékeny.

Hogy a várt egy-két másodperccel szemben a zápor(ok) miért tartott(ak) hozzávetőleg tíz másodpercig, arra kétféle magyarázat született. Ha föltételezzük, hogy a neutrínónak meghatározott nyugalmi tömege van, akkor a nagyobb energiájú neutrínók előbb, a kisebb energiájúak pedig néhány másodperccel később érik el a 160 000 fényévnnyire levő Földet. Ebben az esetben természetesen a megfigyelt neutrínóknak csökkenő energiasorrendben kellett érkezniük. Ezt a föltevést a mérési eredmények közvetlenül nem igazolják, de valamelyes mérési hiba föltételezésével felállítható két-három ilyen, csökkenő energiájú sorozat. Mindezek alapján meghatározható a neutrínó nyugalmi tömege is. (Az eredményeket ma még nem érdemes részletezni, mivel azok egyelőre nem tekinthetők általánosan elfogadottaknak.)

A másik magyarázat (és ez a fent említett két-három sorozat megmagyarázásához is szükséges) így szól: amikor az összeroppanó csillag belsejében létrejövő neutroncsillag sűrűsége kezdi meghaladni a 10^{10} gramm/köbcentiméter értéket, akkor az ilyen rendkívül sűrű anyagon már a neutrínók sem tudnak csak úgy egyszerűen áthatolni. Csupán számtalan ütközés után diffundálhatnak ki a neutroncsillag felszínére, és csak ezután indulhatnak el (közel?) fénysebességgel.

A képet még tovább bonyolítja, hogy egyes (eddig még meg nem erősített) jelentések szerint gravitációshullám-detektorral is észlelték a szupernóvát, méghozzá az első Mont Blanc-méréssel egy időben (pontosabban annál 1,4 másodperccel korábban).

A klasszikus csillagászat számára az 1987 A szupernóva azért különleges, mert a vártnál lényegesen halványabb. (Némi problémát az is okoz, hogy a szupernóvává lett Sanduleak-69202 jelű csillag ugyan szuperóriás, de nem M színképtípusú, hanem B3-as.) Az eredetileg 12 magnitúdós Sanduleak-69202 néhány óra alatt csak 4,4 magnitúdóra fényesedett föl, majd ezután lassú további fényesedés következett április végéig, amikor is a maximális fényesség 2,9 magnitúdó volt.

Ez mindenképpen kevés egy szupernóvától. Ezért merült föl az a gondolat, hogy talán mégsem a Sanduleak-69202 jelű csillag robbant, hanem az ennek közvetlen közelében látszó két másik csillag egyike. (Annál is inkább, mivel – az első jelentések szerint – közvetle-

nül a szupernóva-robbanás után az IUE mesterséges hold továbbra is észlelte a Sanduleak-69202 csillag jelenlétét.) A pontos pozíciómérések azonban kizárták ezt a lehetőséget: a szupernóva pozíciója a mérési pontosságon belül csak a Sanduleak-69202 pozíciójával egyezett meg.

Ekkor az a gondolat merült fel, hogy a szupernóva-robbanás a szóban forgó csillag (eddig még föl nem fedezett) fehér törpe kísérőjén történt, azáltal, hogy annak tömege túlhaladta az 1,44 naptömegnyi kritikus értéket (a Chandrasekhar-határt) annak következtében, hogy a Sanduleak-69202-ről folyamatosan anyag áramlott át rá. Ez a gondolat azért is jónak látszott, mivel számos B színképtípusú „runaway” (a környezetéhez képest nagy sebességgel száguldó) csillag ismeretes, és ezek föltehetőleg úgy jöttek létre, hogy fehér törpe kísérőjük szupernóva-robbanást szenvedett. Ennek az elgondolásnak csak az a hibája, hogy ebben az esetben I-es típusú szupernóva-robbanást kellett volna észlelni a ténylegesen megfigyelt II-es típusúval szemben. A korábban készült fölvételek gondos elemzésével a föltelezett fehér törpe jelenléte is kimutatható kellett volna hogy legyen. Ezek a vizsgálatok azonban azt eredményezték, hogy a Sanduleak-69202-nek nincs, illetve nem volt fehér törpe kísérője.

Az időközben megjelent különféle elméleti számítások szerint a kis fényesség, valamint az a tény, hogy nem egy M, hanem egy B típusú szuperóriás robbant föl, egyaránt a Nagy Magellán-felhőnek a Tejútrendszerétől (és általában a nagy spirálgalaxisokétól) eltérő kémiai összetételével magyarázható. Ami pedig az említett IUE méréseket illeti, kiderült, hogy az IUE nem a Sanduleak-69202-t, hanem egy annak közvetlen közelében lévő, a B3-hoz igen hasonló BO színképosztályú csillagot „látott”.

A kis fényesség mindenesetre nem az egyetlen különleges tulajdonsága az 1987 A szupernóvának. Az is szokatlan, hogy az egy napon belül bekövetkezett mintegy 8 magnitúdós fényességfelfutást két hónapig tartó további lassú, még másfél magnitúdós fényesedés követte.

Rádió- és röntgensugárzást egyelőre nem sikerült megfigyelni (illetve csak igen gyengét) az 1987 A irányából. Ez azonban nem okoz gondot. Ilyen sugárzás ugyanis csak a csillag ledobódó külső rétegeinek lökésfrontja és az intersztelláris anyag kölcsönhatása következményeként várható. Ennek hiánya csak azt mutatja, hogy a csillag közvetlen környezetében (ameddig a lökésfront a szupernóva-robbanás óta eltelt három hónap alatt eljutott) nincs ilyen csillagközi anyag.

A legfrissebb „robbanó Nap” egyelőre több új kérdést vetett föl az asztrofizikusok számára, mint amennyit megválaszolt. Annyit azonban máris elmondhatunk: tudományos jelentősége méltó ahhoz, hogy közel négy évszázad óta ez az első, szabad szemmel is látható szupernóva az égboltunkon.