

Csillagászati tankönyv kezdőknek és haladóknak

Szerkesztették:

Kereszturi Ákos és
Tepliczky István (elektronikus változat)

Magyar Csillagászati Egyesület

Tartalom

Égi mozgások

A nappali égbolt
Az éjszakai égbolt
A Föld tengelyforgása
A Föld keringése és az évszakok
Holdfázisok, fogyatkozások és az árapály

A Naprendszer

A Naprendszert alkotó égitestek csoportjai
A bolygók felosztása
Merkúr
Vénusz
Hold
Mars
Kisbolygók
Jupiter
Szaturnusz
Uránusz
Neptunusz
Plútó-Charon
Üstökösök
Üstökösfelhők a Naprendszer külterületén
Bolygóközi anyag

A csillagok élete

Energiatermelés a csillagokban
Energiaátvitel
Csillagok a fősorozaton

A csillagok fejlődése a fősorozat után
Planetáris ködök
Fehér törpék
Szupernóvák
Neutroncsillagok
Fekete lyukak
Csillagunk a Nap
A Tejútrendszer
A csillagok életkora és a populációk
Csillaghalmazok

A Világegyetem keletkezése

Az ősrobbanás bizonyítékai
A felfűvódó Világegyetem
Egyesített kölcsönhatások
Párkeltés
A galaxisok keletkezése
A Tejútrendszer keletkezése
A csillagok keletkezése
Az elemek keletkezése
A Naprendszer keletkezése
A Világegyetem jövője

Módszertani segédletek

A Világegyetem arányai
A gravitáció mindenek felett
Csillagászat, valamint a részecskefizika
Más világok

Égi mozgások

A nappali égbolt

A nappali égen az egyik leggyakrabban tapasztalt és legkönnyebben megfigyelhető jelenség, az égbolt kék színe. Ennek kialakulásában két tényező játszik fontos szerepet: a Föld légköre és központi csillagunk sugárzása. A bolygónkat övező légburok megváltoztatja a belépő sugárzás összetételét - egyes hullámhossztartományokat átenged, másokat kiolt - valamint megváltoztatja a belépő sugarak irányát is a fénytörés elvének megfelelően. (Az alábbiakban csak a spektrum látható tartományára kifejtett hatásaival ismerkedünk meg.)

A Napból érkező fény belép az atmoszférába, és itt sok atommal, molekulával találkozik. A találkozások alkalmával szóródik, kissé eltérül eredeti irányától, a szóródás mértéke pedig fordított arányban áll a hullámhosszal. Tehát minél nagyobb egy fénysugár hullámhossza, azaz minél vörösebb, annál kevésbé szóródik. Ennek következtében a rövidebb hullámhossztartományból, a spektrum látható részének kék végéből fog a legtöbb szóródni - a légtömegekről is ebből a színből jut legtöbb a szemünkbe, ezért látjuk az égboltot kék színűnek. Amennyiben a levegőben sok por vagy vízpára van, ezek szemcséinek mérete nagy az atomokhoz és molekulákhoz képest, már nem érvényesül az előbbi hatás. A szemcsék nagyjából ugyanannyit szórnak minden hullámhosszból, azaz minden színű fényből, így a színek keverékeként létrejön a fehér árnyalat: és fehéres színt ölt a égbolt. Ha egy adott helyen nagyobb mennyiségű vízpára csoportosul, a róla szóródó erős fehér fény élesen elüt az égi háttértől - ezek a felhők. Napközben csak a legfényesebb égitesteket láthatjuk: a Napot, a Holdat esetleg a Vénuszt. A halványabb bolygók és csillagok nem figyelhetők meg, mivel a levegőben szóródó napfény sokkal erősebb gyenge pislákolásuknál, és elnyomja fényüket. Azokról az égitestekről, amelyek nem rendelkeznek jelentős légkörrel (mint például a Hold), nappal is ugyanúgy láthatók a csillagok, mint éjszaka.

A nappali égbolton látványos változásokat figyelhetünk meg, amikor a Nap a horizont közelében tartózkodik - azaz napkelte és napnyugta környékén. Ekkor a központi csillagunkról érkező fény már sokkal hosszabb utat tesz meg a légkörben, mint magas napálláskor. Amint a fény belép bolygónk sűrű atmoszférájába, eredeti irányától elhajlik: ez a fénytörés. Minél mélyebben merül a légkörbe, annál sűrűbb közeggel találkozik, és annál nagyobb mértékű lesz az elhajlás. Ennek következtében minden égi objektum (kivéve, amelyik pont a fejünk fölött, a zenitben látszik) valójában alacsonyabban van, mint ahogyan azt mi látjuk. Az égitestek képének megemelkedése ott a legnagyobb, ahol a fény a leghosszabb utat teszi meg az atmoszférában, azaz a horizontnál. Ezt derült idő esetén bárki könnyedén megfigyelheti: a napkorong a látóhatár közelében ellapul, mivel az alsó részéről érkező fénysugarak sűrűbb közegen haladnak keresztül, mint a felső részéről érkezők, így jobban elhajlanak. Ezt a jelenséget refrakciónak nevezik, a refrakció értéke a zenitben nulla, a látóhatár felé fokozatosan nő, ahol általában eléri a fél fokot. Tehát amikor a napkorong alja látszólag a horizontot érinti, az a valójában már alatta is van. A légköri fényszóródás hatását ebben az esetben is megfigyelhetjük: ha a Nap a horizont közelében van, fénye hosszú utat tesz meg a légkörben, a fényszóródás is jelentős. A kék szín nagy része így már nem jut el hozzánk, és a napkorong vörös árnyalatban pompázik.

A szürkületi ég színekavalkádjának kialakításában ugyancsak a fényszóródás játszik főszerepet. Az alacsonyabb és sűrűbb légrétegek többit, a magasabbak és ritkábbak pedig kevesebbet

szórnak ki a kékből - így a horizonttól felfelé haladva a vöröstől a kékig terjedő színskálát figyelhetünk meg. A szürkület alatt a fény a légkör távoli részéről érkezik a felettünk található légtömegekre. Időtartama földrajzi szélességenként változó, mivel különböző szélességeken a látóhatárhoz képest más-más szögben ereszkedik a Nap a horizont alá. A polgári szürkület akkor ér véget, amikor a Nap 6 fokkal, a csillagászati pedig, amikor 18 fokkal süllyed a látóhatár alá - ez utóbbi nálunk kb. két óra hosszú.

Az éjszakai égbolt

Ha a Nap annyira mélyen van a látóhatár alatt, hogy a róla érkező, a légkörön szóródó fény sem jut el hozzánk, már nincs ami elnyomja a halvány égitestek fényét - véget ér a szürkület, teljesen besötétedik. Az éjszakai égen megfigyelhető objektumok közül a legfényesebb bolygónk kísérője: a Hold. Mivel a Hold a Föld körül kering, ezért bolygónkról nézve állandóan változtatja a Naphoz viszonyított helyzetét. Ennek következtében jönnek létre a holdfázisok. Felszínének fényvisszaverő képessége nagyon rossz, a sötét hamuéhoz hasonló, de mivel közel helyezkedik el hozzánk, a Nap után a második legfényesebb égitest.

A Holdat követik a közeli bolygók. Mivel a Merkúr és a Vénusz a Földnél közelebb kering a Naphoz, így attól látszólag nem távolodnak el 22 illetve 46 foknál messzebb, hol az egyik, hol a másik oldalán mutatkoznak központi csillagunknak. A Naphoz közelebb keringenek, így a Földnél gyorsabban mozognak - megvilágított és árnyékos oldalukat egyaránt látjuk, ezért a Holdhoz hasonlóan fázisokat mutatnak. A nagybolygók az óramutató járásával ellentétes irányban keringenek, így amikor a Merkúr vagy a Vénusz közeledik hozzánk, a Naptól balra, azaz keletre tűnnek fel az esti égen. Amikor távolodnak tőlünk a Naptól jobbra mutatkoznak, így hajnalban, napfelkelte előtt figyelhetők meg. A bolygók közül a Vénuszt látjuk a legfényesebbnek, mely erős ragyogásával könnyen megtévesztheti az embert. A Földnél távolabb keringő bolygók csak kismértékben vagy egyáltalán nem mutatnak fázisokat. Mivel ezek messzebb keringenek, így lassabban mozognak. Bolygónk rendszeresen lekörözi őket, ebből kifolyólag látszólag hurokszerű mozgást végeznek a csillagos háttérhez képest. A Mars, a Jupiter, a Szaturnusz és kivételes esetekben az Uránusz figyelhető meg közülük szabad szemmel. Mivel a nagybolygók közel egy síkban keringenek a Nap körül, így ugyanabban az égi sávban mutatkoznak. Ennek a sávnak a közepén húzódik az égi ekliptika, amelyet a Nap, Földről megfigyelhető éves égi útja rajzol ki.

Ha jó a légköri átlátszóság és mesterséges fények sem zavarnak, egy derült éjszakán több ezer csillagot is láthatunk szabad szemmel. A csillagok közötti tájékozódást a csillagképek könnyítik meg. Már az ókorban kialakította minden nép a saját csillagképeit, ekkor még többnyire vallásos indítékkal. Ezeknek egy része a későbbiekben is fennmaradt, mivel egyszerűbbé tették az egyes égi objektumok megtalálását és az égen való tájékozódást. Ma 88 csillagképre osztjuk az égboltot. Egy csillagképbe azok a csillagok tartoznak, amelyek a csillagképet határoló vonalakon belül látszanak bolygónkról. Egy adott csillagképhez tartozó csillagok természetesen különböző távolságokban helyezkedhetnek el, így nem állnak egymással közeli kapcsolatban. A csillagképek számának, helyének, méretének, alakjának, határvonalainak, elnevezésének meghatározása teljesen önkényes, egyedül az égbolton történő könnyebb tájékozódást szolgálja. Az éjszakai égen egy szabálytalan körvonalú, halvány fényszalagot is megfigyelhetünk: ez a Tejút. A Tejút valójában csillagok millióinak együttese, melyeket szabad szemmel nem tudunk különválasztani, így összefüggő sávnak látjuk őket. Galaxisunk, a Tejútrendszer anyagának nagy része egy lapos, korong alakú térrészben koncentrálódik, és mivel Napunk ebben a síkban helyezkedik el, így kitekintve csak a korong metszetét, mint az égen átívelő sávot láthatjuk.

A Föld tengelyforgása

Bolygónk 23 óra 56 perc 4,09 másodperc alatt fordul meg egyszer a tengelye körül (ez az időtartam a csillagnap), amit mi úgy érzékelünk, mintha az égbolt fordulna el ugyanennyi idő alatt felettünk. Mivel a Föld nyugatról kelet felé forog, az égbolt és az égi objektumok keletről nyugat felé látszanak elmozdulni. A forgás következtében látszik körbejárni a Nap is, így jönnek létre a nappalok, amikor a Nap a horizont felett tartózkodik, és az éjszakák, amikor pedig alatta. A Nap lenyugvása utáni (illetve felkelte előtti) rövidebb átmeneti időszak a szürkület. A Föld forgástengelye jelöli ki az égtájakat is. A tengely két végét északi, illetve déli égtájnak, az erre merőleges két irány közül azt, amerre az égitestek kelni látszanak keleti, amerre pedig nyugodni, nyugati égtájnak nevezzük.

A Nap égi járásának a Föld különböző szélességein elhelyezkedő megfigyelők más-más módon lesznek tanúi. Amikor a Nap pontosan keleten kel és nyugaton nyugszik, az egyenlítőről nézve fejük felett, a zenitben delel. Ugyanekkor a pólusoknál vízszintesen körbejárni látszik, köztes szélességeken pedig pályája kisebb-nagyobb szöget zár be a függőlegessel. Ez természetesen csak akkor történhet meg, ha a Föld egyenlítője pontosan a Nap felé mutat. A valóságban ez ritka helyzet, mivel bolygónk forgástengelye a pályasíkra állított merőlegeshez képest 23,5 fokos szöget zár be. A tengely térbeli helyzete első megközelítésben stabilnak mondható, azaz a Föld, Nap körüli keringése során állandóan egy irányba mutat.

Azt a pontot, ahol a forgástengely képzeletben metszi az égboltot (illetve a bolygónk köré vont tetszőleges sugarú képzeletbeli éggömböt), égi pólusnak nevezzük. Ez az északi oldalon egy fényes csillag közelébe esik, amelyet innen Polarisnak, Sarkcsillagnak neveztek el. Az égbolt látszólag ekörül fordul körbe minden nap. A mi szélességünkről a pólus 47,5 fok magasan látszik a horizont felett. Azok a csillagok, amelyek 47,5 foknál közelebb látszanak a pólushoz, napi járásuk során soha nem érik el a horizontot, azaz soha nem nyugszanak le. Ezeket nevezik cirkumpoláris csillagképeknek. Azok az égi objektumok, amelyek ennél messzebb látszanak a pólustól, minden nap felkelnek és lenyugszanak, több-kevesebb időt töltve a horizont felett. Vannak olyan égitestek is, amelyek annyira messze vannak a pólustól (132,5 foknál messzebb), hogy a mi szélességünkről nézve látszólag nem is kelnek fel. Ezek az objektumok hazánk földrajzi szélességéről nem figyelhetők meg. Ha egy észlelő a Föld valamelyik pólusán helyezkedik el, az égi pólus pontosan a feje felett található, amely körül az objektumok mozognak - így minden csillag cirkumpoláris. (Kivéve a Napot!) Amennyiben az egyenlítőn állunk, a két pólus pont a horizont északi és déli pontján található, innen nézve minden égi objektum felkel és lenyugszik, azaz nincsenek cirkumpoláris csillagok.

A Föld tengelyforgása a valóságban nem egyenletes, kisebb szabálytalanságok mutatkoznak benne. Ezek közül az egyik legfontosabb a tengelyforgás lassulása, azaz a napok hosszának növekedése. A jelenségért főleg a Hold által keltett dagályhullám felelős, amely égi kísérőnk-höz képest rögzített helyzetű. A Föld így elfordul „alatta”, és az bolygónkra állandó fékező erőt fejt ki. A lassulás mértéke évenként 0,0029 másodperc. Vannak ezenkívül periodikus ingadozások is, amelyek hol gyorsítják, hol pedig lassítják bolygónk tengelyforgását.

A Föld keringése és az évszakok

Bolygónk egy enyhén elnyúlt, ellipszis alakú pályán kerüli meg a Napot 365 nap 6 óra 9 perc 9 másodperc alatt. Ezt nevezik csillagászati évnek, amely a Napnak az égi ekliptika ugyanazon pontján két egymást követő áthaladása között telik el. A Föld napközelpontja (perihélium) 147,1 millió km-re, naptávolpontja (aphélium) 152,1 millió km-re húzódik központi csillagunktól, átlagos naptávolsága 149,6 millió km. A Nap körüli keringést a Földről a Nap lassú, a

háttércsillagok előtt történő látszólagos körbevándorlásaként figyelhetjük meg. A Föld Nap körüli keringésének síkja az ekliptika, így a Nap égen megtett útja ennek égi vetülete, amelyet égi ekliptikának nevezünk. Mivel a Föld forgástengelye 23,5 fokos szöget zár be az ekliptikára állított merőlegeshez képest, egyenlítőnk égre vetített képe: az égi egyenlítő ugyancsak ekkora szöget zár be az égi ekliptikához képest. Ezzel kapcsolatban számos érdekes megfigyelés tehető, ezeket az egyszerűség kedvéért az északi félteke példáján, hazánk földrajzi szélességéről mutatjuk be.

Amikor a forgástengely északi pólusa van közelebb a Naphoz, központi csillagunk látszólag az ekliptikának az égi egyenlítő „feletti”, attól észak felé eső részén tartózkodik. Minél közelebb látszik egy égitest az északi pólushoz, annál hosszabb időt tölt a horizont felett. Ekkor a Nap is hosszabb időn át van a látóhatár felett, és magasabbra is jut az égen. A Nap legnagyobb delelési magasságát a nyári napforduló napján, június 22-én éri el 66 fokkal a látóhatár felett. Hosszabb időn át árasztja sugarait (hosszabb a nappal), mivel több időt tölt a horizont felett; és magasabbról süt, így adott területre nagyobb mennyiségű sugárzása jut. A Nap ekkor északkeleten kel és északnyugaton nyugszik. A terület felmelegedése erős - ilyenkor van nyár az északi féltekén. Ahogy bolygónk folytatja Nap körüli keringését (mivel a forgástengely a térben közel stabil helyzetű), az északi pólus a Naptól távolodni kezd, a déli pedig közeledni. Eközben az északi féltekéről azt láthatjuk, hogy a Nap egyre délebben, egyre alacsonyabban mutatkozik az égen. Egyre alacsonyabbról süt, egységnyi területre egyre kisebb energiát ad; és egyre rövidebb ideig tartózkodik a horizont felett, azaz a nappalok rövidülnek és az éjszakák hosszabbodnak. Egyre délebbi ponton kel és nyugszik, és ezek együttes következményeként csökken a hőmérséklet.

Amint a Nap egyre délebbre vándorol az ekliptika mentén, szeptember 23-án eléri az ekliptika és az égi egyenlítő metszéspontját, amelyet őszpontnak nevezünk. Ez az őszi napéjegyenlőség napja, ekkor a Nap ugyanannyi időt tölt a horizont felett, mint alatta, így a nappal és az éjszaka hossza megegyezik. A delelés magassága azonos földrajzi szélességünkkel, ezen a napon központi csillagunk pontosan keleten kel és nyugaton nyugszik. Amint a következő napokban folytatja látszólagos útját, az éjszakák hosszabbak lesznek a nappaloknál, a besugárzás tovább gyengül és egyre hidegebb lesz. Egyre délebben kel és nyugszik, december 22-én éri el útjának legdélibb pontját. Ekkor a mi szélességünkről nézve még deleléskor is mindössze 19 fokkal emelkedik a horizont fölé, ilyenkor a leggyengébb a besugárzás. A Nap délkeleten kel és délnyugaton nyugszik. Ez a téli napforduló, ami után ismét észak felé veszi útját központi csillagunk, és fokozatosan emelkedni kezd. Március 21-én érkezik el az ekliptika és az égi egyenlítő másik metszéspontjába, amelyet tavaszpontnak nevezünk. A tavaszi napfordulót követően ismét az éjszakák lesznek a rövidebbek és a nappalok a hosszabbak. A tél és a nyár hőmérsékleti maximuma illetve minimuma nem esik egybe a maximális illetve minimális besugárzás időpontjával, mivel az egyes területek felmelegedéséhez és lehüléséhez idő szükséges. Ennek következtében 1-2 hónapot késnek az évszakok.

A Nap éves járásának, a különböző földrajzi szélességeken elhelyezkedő megfigyelők más és más módon lesznek tanúi. Ha pontosan a póluson tartózkodunk, a Nap majdnem fél évet van a horizont felett, és közel ugyanennyit alatta, azaz itt fél évig tart a nappal és újabb fél évig az éjszaka (eltekintve a szürkülettől). Az északi pólusnál a helyi nyár idején a Nap június 22-én delel, 23,5 fokkal a horizont felett. Ezután lassan süllyedni kezd - a Föld tengelyforgása miatt természetesen 24 óra alatt mindig körbejár, de nem jut a horizont alá - és egy enyhe spirális mentén megközelíti a látóhatárt. Miután lenyugszik, féléves éjszaka borul az északi pólusra. A Nap az egyenlítőn június 22-én éri el útjának legészakibb pontját, ekkor 66,5 fokkal delel a horizont felett. Az őszi és tavaszi napéjegyenlőségkor delel a zenitben, majd a téli napfordulókor legdélebben, ismét 66,5 fokkal a horizont felett. A nyári napforduló alkalmával a Nap a

Ráktérítő felett delel a zenitben, ekkor látszólag a Bika csillagképben tartózkodik. Itt „fordul meg” és veszi útját ismét dél felé. (Régebben ez a pont a Rák csillagképben helyezkedett el, innen a Ráktérítő elnevezés.) A Baktérítőnél a helyzet hasonló, csak itt a Nyilas csillagképben tartózkodik, amikor észak felé veszi útját.

Bolygónk forgástengelyének térbeli helyzete csak közelítőleg nevezhető stabilnak, a valóságban lassan változik, ezt nevezik pólusingadozásnak. Ennek két fő összetevője van: a precesszió és a nutáció. A Föld átmérője az egyenlítőn nagyobb, mint a pólusoknál. Bolygónk forgástengelye 23,5 fokos szöget zár be a pályasíkra állított merőlegeshez képest - amit a Nap és a Hold csökkenteni próbál, és forgatónyomatékokot fejt ki ellipszoid alakú bolygónkra. Ennek a Föld, tehetetlensége folytán megpróbál ellenállni, és a két hatás eredőjeként a forgástengely az ekliptika síkjára állított merőlegeshez képest egy kúpfelület mentén körbejár. Így az ekliptika és az égi egyenlítő metszéspontjának égi helyzete is megváltozik, és a tavaszpont (természetesen az ősypont is) évenként 50 ívmásodpercet nyugat felé vándorol, 25729 év alatt pedig teljesen körbefordul. Ezt nevezik precesszióknak, ez az oka annak is, hogy a nyári napforduló idején ma már nem a Rák csillagképben tartózkodik a Nap. A nutáció létrejöttének oka, hogy a Hold pályasíkja 5 fokos szöget zár be az ekliptikával, a kettő metszéspontja az előbb említetthez hasonlóan körbejár, 18,6 évenként megtéve egy teljes fordulatot. Ez a periodicitás ráakad a precesszióra, így bolygónk forgástengelye nem egy sima, hanem egy hullámos kúpfelület mentén mozog.

Holdfázisok, fogyatkozások és az árapály

A Hold Földünk kísérője. Földközeli 354 ezer km-re, földtávolban 404 ezer km-re, átlagosan pedig 384 ezer km-re van bolygónktól. A Földet 27,3 nap alatt kerüli meg. Keringésének időtartama pontosan egybeesik tengelyforgásának időtartamával, azaz mindig ugyanazt az oldalát fordítja a Föld felé, ezt nevezik kötött tengelyforgásnak. (A kötött tengelyforgás természetesen csak a Földre vonatkoztatva igaz.) A Hold felszínén ugyanúgy váltakoznak a nappalok és az éjszakák, mint bolygónkon, de egy holdi nap hosszabb az előbb említett 27,3 napos időtartamnál. Ennek oka, hogy a Föld kering a Nap körül, így változik a Nap csillagokhoz viszonyított helyzete. A Holdnak kicsit tovább kell haladnia pályáján, hogy ezt az elmozdulást kompenzálja, és a Nap ismét arról az adott holdrajzi pontról deleljen - ehhez 2,2 nap kell. Egy holdi nap időtartama így 29,5 nap, és ennek megfelelően figyelhetjük meg periodikus fényváltozását.

A holdfázisok kialakulása a Nap, a Hold és a Föld egymáshoz viszonyított relatív helyzetétől függ. A Nap állandóan ugyanakkora részét világítja meg égi kísérőnknek, a fázis nagyságát az határozza meg, hogy mi mekkora hányadát látjuk ennek. Amikor Holdunk, a Földről nézve a Nap közelében tartózkodik, megvilágított részét nem láthatjuk, ekkor van újhold. Az esti láthatósága során napsütötte részéből egyre többet figyelhetünk meg, és amikor ennek fele válik láthatóvá, elérkezünk az első negyedhez. Teleholdkor a teljes megvilágított félgömböt láthatjuk, utolsó negyedkor, hajnalban pedig ismét csak a felét. Amikor a Hold relatíve közel látszik a Naphoz (első negyed előtt, utolsó negyed után), árnyékos oldalán megfigyelhetjük a Föld légköréről a Holdra vetülő, majd onnan ismét visszaverődő fényt, ezt nevezik hamuszürke fénynek.

A Föld és a Hold is - mint minden átlátszatlan test - árnyékot vet a Nap fényében. Amikor a Hold árnyéka a Föld felszínére vetül, napfogyatkozásról, amikor a Föld árnyéka a Hold felszínére, holdfogyatkozásról beszélünk. A Hold kb. 400-szor közelebb van a Földhöz, mint a Nap, de kb. 400-szor kisebb is annál. Ennek következtében nagyjából azonos méretű korongnak látjuk mindkét égitestet.

Napfogyatkozás csak újholdkor következik be. Annak magyarázata, hogy miért nincs napfogyatkozás minden újhold alkalmával, a Hold pályájának a Földéhez viszonyított helyzetében keresendő. A Hold pályasíkja 5 fokkal hajlik az ekliptikához, így csak akkor lehet fogyatkozás, amikor a Hold ennek a két pályasíknak valamelyik metszéspontjában vagy annak közelében tartózkodik. A Hold természetesen havonta kétszer áthalad ezeken a pontokon, ez azonban ritkán esik egybe az újholddal vagy a teleholddal. Amennyiben újholdkor ér a csomópontba, napfogyatkozás van. Ha a Hold teljesen eltakarja a napkorongot, akkor teljes napfogyatkozás következik be. Mivel a Hold kis égitest, ezért árnyékkúpja csak kis területre vetül a Föld felszínén. Teljes napfogyatkozás így mindig csak egy szűk sávból látható. A legkedvezőbb esetben egy adott ponton a teljes napfogyatkozás maximális időtartama 7,5 perc. A teljes fogyatkozás zónáján kívül széles sávban részleges a fogyatkozás, itt a Hold nem takarja el az egész napkorongot. Amikor a Hold földtávolban, a Föld pedig napközben van, a Nap látszólagos átmérője nagyobb a Holdénál. Ekkor a Hold nem tudja eltakarni a teljes napkorongot és ilyenkor következik be gyűrűs napfogyatkozás, maximális időtartama 12,5 perc. Teljes fogyatkozás alkalmával a nappali égen feltűnnek a fényesebb csillagok és bolygók, valamint megfigyelhetővé válik a napkorona.

A Föld árnyékkúpjának csúcsa elméletileg átlagosan 217 földszugárnyira terjed, a Hold átlagosan 60 földszugár távolságban kering. A Föld azonban légkörrel rendelkezik, így a Nap sugarait megtöri. Emiatt a teljes árnyék kúpja lerövidül, és közelebb kerül a Hold távolságánál, így az a valóságban soha sem éri el égi kísérőnket. A légkör által szórt fény nagysága és színe a légkör állapotától függ, így a holdfogyatkozások alkalmával több-kevesebb fényt kap égi kísérőnk, aminek következtében általában sötétvörös színben dereng. Teljes a fogyatkozás, ha a Hold teljes terjedelmében az árnyékkúpba merül. (Centrálisnak nevezzük, amennyiben a Hold az árnyékkúp tengelyén halad át, ekkor a fogyatkozás mindig teljes.) Részleges a fogyatkozás, ha a Hold nem pontosan a csomóponton halad át holdtöltekor, így csak részben merül bele bolygónk árnyékába.

Az égitestek egymásra kifejtett gravitációs hatása következtében tapasztalható - többek között - az árapály jelensége is. A Földön legerősebben a Hold és a Nap hatása érvényesül. Az általános tömegvonzás törvénye értelmében a vonzóerő a távolság négyzetével fordított arányban áll. A Hold így nagyobb erővel húzza maga felé bolygónknak a hozzá közelebb eső részét, mint a távolabbit: azaz a Földnek a Hold felőli oldala enyhén kidudorodik. A Föld a Föld-Hold rendszer tömegközéppontja körül kering, amely bolygónk belsejében található. Emiatt a Holddal ellentétes oldalon centrifugális erő lép fel, ez az átellenben lévő oldalon hoz létre dagályt. Ugyanilyen hatást fejt ki a Nap is, ennek mértéke azonban kisebb - a Hold kis tömegét ugyanis ellensúlyozza közelsége. A Hold és a Nap által a Földre kifejtett árapály torzulás egymásra rakódik, erősítik vagy gyengítik egymást. Újhold és telehold környékén, a Hold által keltett dagálykúp a Nap által létrehozottal egybeesik, ekkor éri el az árhullám maximális méretét, ez a szökőár. Első vagy utolsó negyed környékén pedig gyengítik egymás hatását, ezt nevezik vakárnak. Bolygónk a tengelyforgás következtében elfordul a dagály kúpok alatt, így egy adott földrajzi ponton egy nap folyamán majdnem két alkalommal figyelhető meg apály és dagály. A valóságban 24 óra 50 perc alatt zajlik le két dagály és két apály. Ennek oka, hogy amíg a Föld egyszer megfordul tengelye körül, a Hold kissé tovább mozog pályáján, amit bolygónknak kompenzálnia kell. (24 óra 50 perc a Hold két delelése közötti időtartam.) A jelenség következtében a szilárd kéregben létrejövő apály és dagály hullámok magasságkülönbsége centiméteres, a folyékony vízburokban méteres nagyságrendű. A Föld, tengelyforgása során megpróbálja „magával húzni” a dagálykúpot, amelyet a Hold nem enged. Mivel a Föld folyamatosan elfordul a dagálykúp alatt, súrlódás lép fel, ami bolygónk tengelyforgását lassítja, és a Hold pályájának sugarát fokozatosan növeli.

A Naprendszer

A Naprendszer kifejezés, mint ahogyan azt a két szó összetétele is mutatja, központi csillagunkhoz: a Naphoz tartozó égitestek rendszerét jelenti. A Nap kitüntetett helyet foglal el benne, gravitációs hatása és sugárzása uralja a rendszert. A Naprendszerhez tartozó objektumokat a Nap, hatalmas tömegéből származó erős gravitációs terével tartja maga körül záródó pályán. A Naprendszer égitestjeinek nagyrésze egy sík közelében, ugyanabban az irányban kering. (Ez a Föld északi pólusa felől nézve az óramutató járásával ellentétes irány, amelyet direkt iránynak neveznek, az ezzel ellenkezőt pedig retrográdnak.) A Naprendszer határát ugyanúgy nehéz meghúzni, mint pl. a Föld légkörének határát. Általában a Naprendszerhez tartozó égitestnek szoktuk tekinteni azt az objektumot, amely a Naptól mért két fényéves távolságon belül helyezkedik el.

A Naprendszert alkotó égitestek csoportjai

A Naprendszert alkotó égitesteket jellemzőik alapján az alábbi csoportokba sorolhatjuk:

Nap: Csillag

A Naprendszer központi égiteste, benne összpontosul az egész rendszer tömegének 99,87%-a, minden más égitest a maradék 0,13%-on osztozik. Az egyetlen objektum a Naprendszerben, amelynek elegendően nagy a tömege ahhoz, hogy termonukleáris reakciók segítségével energiát termeljen, azaz csillag legyen. A tömegeloszlással ellentétben a Naprendszer összimpulzusmomentumának csak kétszázad része esik a Napra. A lendület nagyrészt a bolygórendszer keletkezése során elvesztette, illetve valamilyen folyamat segítségével átadta a körülötte keringő égitesteknek.

Nagybolygók

A Nap körül keringő nagyobb méretű égitestek, átmérőjük 140 ezer és 2 ezer km közötti, alakjuk gömbszimmetrikus. Saját hőtermeléssel rendelkeznek, amely radioaktív elemek bomlásából illetve lassú összehúzódásukból származik - ennek a hőtermelésnek nagysága azonban elhanyagolható a Napéhoz képest. Két altípusuk van: a belső, vagy Föld-típusú bolygók és a külső, vagy Jupiter-típusú bolygók, azaz óriásbolygók. A két csoport tagjai egyéb jellemzőikben is különböznek: a belső bolygókat főleg nehezebb elemek alkotják, míg a külső bolygók nagyrészt könnyű elemekből állnak.

Holdak

A bolygók körül keringő égitestek. Belső hőtermelésük még kisebb, mint a bolygóké, vagy egyáltalán nincsen; alakjuk gyakran gömbszimmetrikus, de a kisebbek szabálytalanok. Átmérőjük 5000 km-től egészen néhány km-es, méteres nagyságig terjed. Megkülönböztetünk eredeti, az adott bolygóval együtt, egyszerre kialakult holdakat, és a bolygóközi térből befogott (kaptált) holdakat.

Kisbolygók

Átmérőjük 1000 km-nél kisebb, anyaguk főleg a belső bolygókéhoz hasonlít. A Naprendszer belső részén a bolygóközi térben keringenek, többségük a Mars és a Jupiter pályája között található a kisbolygóövben.

Üstökösök

Általában 100 km-nél kisebb égitestek, fagyott illékony gázokból és kevés nehéz elemből állnak. A nagybolygók között illetve azokon túl, a Naprendszer külső részén keringenek. Megfigyelésükre többnyire csak akkor nyílik lehetőség, ha a Nap közelébe kerülnek, és látványos kómát, csóvát fejlesztenek.

Bolygóközi (interplanetáris) anyag

Két komponensre bontható: bolygóközi gázra és porra. A bolygóközi gáz: a bolygóközi térben található ionizált és semleges állapotban lévő gázanyag, melynek fő forrása a Nap. Bolygóközi por: a bolygók közötti térben a méretskála minden szintjén találhatunk szilárd objektumokat, a kisbolygók km-es nagyságrendjétől egészen a mikroszkopikus méretű porszemcsékig. Ezenkívül elektromágneses és részecskesugárzásokkal teli a bolygók közötti tér, ezek nagyrésze szintén a Napból származik.

A bolygók felosztása

A nagybolygókat belső szerkezetük és elhelyezkedésük alapján két csoportra oszthatjuk: belső vagy Föld-típusú és külső, Jupiter-típusú vagy óriásbolygókra. Belső bolygók a Merkúr, a Vénusz, a Föld és a Mars, ezek keringési távolsága a Naptól 0,4-1,5 Cs.E. közötti. (Egy csillagászati egységnek, Cs.E.-nek nevezzük a Föld átlagos naptávolságát: 149 millió 598 ezer km-t.) Az óriásbolygók: a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz; keringési távolságuk 5-30 Cs.E. közötti. A kilencedik nagybolygónak tartott objektum, a Plútó besorolásáról a későbbiekben esik szó. Az összes nagybolygó direkt irányban kering a Nap körül, közel egy síkban.

A Föld-típusú bolygók jellemzői: Átmérőjük 13 ezer-5 ezer km, tömegük 1-0,055 földtömeg közötti. Főleg nehéz elemekből, fémekből, szilikátokból, szén alapú vegyületekből, különféle oxidokból épülnek föl, átlagos sűrűségük nagy, 3,9-5,5 g/cm³. A bennük található radioaktív elemek bomlásából kifolyólag saját hőtermeléssel rendelkeznek. Ez a belsejüket folyékony állapotban tartotta illetve tartja, így az elemek bennük fajsúly szerinti rétegekbe rendeződtek, differenciálódtak. (A differenciálódásban a fémes mag kialakulása során felszabaduló gravitációs potenciális energia is fontos szerepet játszott.) Szilárd felszínnel rendelkeznek, amelyen a belső hő hatására létrejött aktivitás nyomai láthatók.

Az óriásbolygók jellemzői: Átmérőjük 140 ezer-50 ezer km, tömegük 200-15 földtömeg közötti. Főleg könnyű gázokból, hidrogénből és héliumból, valamint szénhidrogénekből, vízből épülnek fel. Átlagos sűrűségük kicsi: 0,7-1,7 g/cm³ közötti. Jelentős belső hőtermeléssel rendelkeznek, ami általában a bolygó lassú, globális összehúzódásából származik. Középpontjukban fémet és kőzeteket tartalmazó mag található, ezt egy folyékony hidrogénből vagy vízből álló köpeny vesz körül, amit vastag légkör takar. Szilárd felszínük nincs, anyaguk gáz és folyékony halmazállapotban van. Gazdag hold- és gyűrűrendszerrel rendelkeznek.

Merkúr

A Naphoz legközelebb keringő nagybolygó, átmérője mindössze 0,38 földátmérő, tömege 0,055 földtömeg. Erősen elnyúlt pályán kerüli meg a Napot, napközeli- és naptávolpontja közötti különbség átlagos naptávolságának 41%-át teszi ki. Tengelyforgási ideje pontosan kétharmada a keringési időnek (direkt irányban), azaz míg kétszer kerüli meg a Napot, pontosan háromszor fordul meg tengelye körül. Ezt a 2:3 arányú rezonanciát valószínűleg a

Nap árapályhatása hozta létre. A Földről nézve látszólag mindig a Nap közelében tartózkodik, attól 22 foknál messzebb nem távolodik el az égen; a Holdhoz hasonlóan fázisokat mutat.

Belső felépítés és légkör: átlagos sűrűsége $5,4 \text{ g/cm}^3$, ami elég közel áll a Föld átlagos sűrűségéhez. Mivel a tömege sokkal kisebb bolygónkénál, így saját gravitációs tere hatására kevésbé van „összenyomva” - azaz valójában több nehéz elem található egységnyi térfogatban, mint a Földében. Ez nagy, fémes magjában is tükröződik, amelynek a bolygóhoz viszonyított mérete a legnagyobb az összes bolygó között. Ennek sugara kb. 1800 km, jelenleg nem tudni, hogy folyékony vagy szilárd állapotban van-e. A köpeny és kéreg vastagsága együtt mintegy 650 km. Légköre rendkívül ritka, az a kevés gáz amely körülötte található, főleg a napszél ionjaiból származik. Ezeket gyenge mágneses terével befogja, és a felszínnel történő ütközés alkalmával semlegesítődnek. Jelentős atmoszféra híján nagy a napi hőingás, napközben a maximális hőmérséklet $+430^\circ\text{C}$, éjszaka a minimális -170°C fok.

Felszín: A Merkúr felszínét sok kráter borítja. Ezek közül a legidősebbek kb. 4 milliárd évesek, azaz felszíne nem őrizte meg az első félmilliárd évben történt becsapódások nyomait. (A nagybolygók összeállása 4,6 milliárd évvel ezelőtt történhetett meg.) Ennek oka a Merkúr kezdeti aktív vulkanizmusa lehetett, amely eltörölte a legelső krátereket. A bolygó összeállása után a radioaktív elemek bomlásától és a kezdeti hőtől felmelegedett, ennek hatására sugara 7-9 km-el megnőtt. A tágulás során a fiatal kéreg sok helyen felrepedezett, és a magma a felszínre tört, elöntve és eltörölve a korábbi krátereket. Kis tömege miatt a radioaktív fűtőanyagok mennyisége kevés volt, a bolygó a későbbiekben lassanként hűlni kezdett, és a vulkanikus aktivitás fokozatosan alábbhagyott. A lassú hűlés során 1-2 km-rel csökkent a Merkúr sugara, a kéreg magmacsatornái pedig fokozatosan elzárultak - ma már valószínűleg nem működnek vulkánok az égitesten. Az összehúzódás hatására kialakult gyűrődések megfigyelhetők a bolygó felszínén.

A földi radarmegfigyelések az utóbbi években arra az eredményre vezettek, hogy a Merkúr pólusai hósapkával rendelkeznek. A képződmények nem túl nagyok, és anyaguk csak foltokban borítja a sarkok környékét. Felfedezésük a bolygó felszínén uralkodó rendkívül magas nappali hőmérséklet miatt volt váratlan. A Merkúr és a Nap erős gravitációs kapcsolata következtében a bolygó forgástengelye merőleges pályasíkjára, azaz az egyenlítőről nézve a Nap mindig a zenitben delel. Így a pólusok környékén a mélyebb kráterek belsejébe nem jut közvetlen napfény, ott a hőmérséklet rendkívül alacsony marad. A megfigyelések szerint vízjég 80 foknál magasabb szélességen elhelyezkedő mély kráterek fenekén található - eredete egyelőre ismeretlen.

Vénusz

A Vénusz a Naptól távolodva a második nagybolygó, amelyet bizonyos hasonlóságok alapján hosszú ideig a Föld ikertestvérének tartottak. Átmérője mindössze 600 km-el kisebb bolygónkénál, tömege 82%-a a Földének, sűrűsége pedig csak 2%-al kevesebb, mint Földünké. Belseje differenciálódott, magjának sugara 3000 km, köpenye ugyancsak 3000 km körüli vastagságú lehet, melyet néhányszor 10 km-es kéreg borít. Tengelyforgása különös, egy fordulat időtartama rendkívül hosszú: 243 nap, ráadásul retrográd irányban. Tengelyforgási ideje közel 2:3 arányú rezonanciában van a Föld keringési idejével. Így minden alkalommal, amikor a Nap és a Föld közé kerül, ugyanazt az oldalát fordítja felénk. A Vénusz pályájának alakja nagyon közel áll a körhöz, forgástengelye 2,6 fokos szöget zár be a pályasíkra állított merőlegessel. A Földről nézve központi csillagunktól nem távolodik el 46 foknál messzebb az égen, a Holdhoz hasonlóan fázisokat mutat.

Légkör: Atmoszférája rendkívül sűrű és nagytömegű. Fő összetevője a széndioxid, ezenkívül kevés nitrogén, kéndioxid, vízgőz és oxigén található benne. Míg bolygónkon a troposzféra határa, amely alatt az általános földi légkörzés jelenségei lejátszódnak nagyjából 10-12 km magasságban húzódik, ugyanez a határ a Vénusznál 100 km magasban található. Felhőzete és légköre annyira átlátszatlan, hogy felszínét közvetlenül soha nem lehet megpillantani. Felhői 50-70 km-es magasság között helyezkednek el, fő alkotóik kénsavban gazdag vízcseppek. A felhőkből folyamatosan savas eső hull alá, ez azonban a magas hőmérséklet miatt fokozatosan elpárolog, és soha nem éri el a felszínt. A párolgás és a disszociációs folyamatok révén vízgőz, kéndioxid, molekuláris oxigén és számos kénvegyület keletkezik. Ezek a légkörzéssel ismét feljutnak a felhők tetejére, ahol a Nap ultraibolya sugárzásának hatására kénsav és kén keletkezik belőlük - így kénsav körforgás jön létre a légkörben. Az atmoszférában nagy erejű szelek fújnak. A felhőréteg tetején 100 m/s-os állandó szél van, amelynek következtében a légkörnek ez a magas része négy nap alatt direkt irányban körbefordul - oka egyelőre nem tisztázott. A szél lefelé haladva fokozatosan gyengül, és a felszínen már mindössze 1-2 m/s sebességű az áramlás. Az egyenlítőtől a pólusok felé tartó nagy légkörzési rendszer is megfigyelhető, akárcsak a Földön. Itt azonban sokkal nagyobb méretű, és a légtömegek egészen a pólusok közelébe jutnak. Az egyenlítőnél felemelkedő gázok 60-70 km-es magasságban a sarkok felé áramlanak, majd azok közelébe jutva lejjebb ereszkednek, és 50-55 km-en visszaáramlanak.

A Vénuszt érő napsugárzás 75%-a visszaverődik a légkörről, 22% elnyelődik, és mindössze 2-3% jut le a felszínre. A nagytömegű légkör miatt a felszíni légnyomás 90-szerese a földinek, a hőmérséklet pedig 450-500 °C. A magas hőmérséklet oka a rendkívül erős üvegházhatásban keresendő. A Vénusz a jelenleginél valószínűleg sokkal hűvösebb légkörrel kezdte életét. A nagyobb napközelség és talán az erős vulkanikus aktivitás hatására vizének nagyrésze a légkörbe párolgott, gyenge üvegházhatást váltott ki. Ezen hatás és a vulkanizmus miatt olyan forróvá vált a felszín, hogy a széndioxid-tartalmú kőzetekből a gáz elkezdett kipárologni. Ez tovább erősítette az üvegházhatást, és pozitív visszacsatolás jött létre: minél több volt a széndioxid a légkörben, annál magasabb lett a hőmérséklet, ez pedig újabb széndioxid-kipárologást eredményezett. A folyamat egészen addig tartott, míg a felszíni kőzetekből az összes széndioxid a légkörbe jutott. (Időközben az eredeti víz nagyrészt elvesztette a Vénusz, a felhőzet tetejére jutó vízmolekulákat a Nap ultraibolya sugárzása elbontotta, a hidrogén pedig elszökött a világűrbe. Bolygónknál ugyanezt a folyamatot a nagyobb naptávolság, és az ultraibolya sugarakat kiszűrő ózonpajzs korai kialakulása akadályozta meg. Amennyiben a Vénusz légköre olyan lenne, mint a Földé, átlagosan +38 °C uralkodna a bolygón.) Az üvegházhatás miatt a felszínen szélességtől függetlenül mindenütt közel ugyanakkora hőmérséklet uralkodik, nincsen sem napi, sem pedig évszakos hőingás.

Felszín: a Vénusz felszínén a fényviszonyok a Földön egy erősen borús, őszi napnak felelnek meg. Az égbolt élénk narancssárga színű, a Nap helyzete nem állapítható meg, a látótávolság 2-3 km körüli. Éjszaka a magas hőmérséklet miatt a sziklák sötétvörösén izzanak. Az űrszondák leszálló egységeinek vizsgálata arra utal, hogy a felszín a talajtérés helyén vulkanikus bazaltból áll.

A Vénusz felszíne nagyrészt lávasíkságok borítják. Kora 500 millió év körüli, 800 millió évnél idősebb területeket egyáltalán nem találni a bolygón, tehát egészen fiatal. Ennek egyik lehetséges magyarázata, hogy a felszínt átalakító erők folyamatosan és közel egyenletesen működnek a bolygón. Egy másik elgondolás szerint azonban a Vénusz belső aktivitása ciklikus. Vannak olyan periódusok, amikor heves gomolyáramlások indulnak meg a mélyből, és a felszínt nagymértékben átalakítják - majd az ilyen időszakokat nyugodtabb ciklusok

követik. Mindenesetre jelentős belső aktivitással rendelkezett vagy még rendelkezik ma is a Vénusz.

Kráterek: a Vénusz sűrű légkörében a világűrből bezuhanó kisebb testek mind elégnék, így azok nem jutnak el a felszínig, és nem tudnak krátereket létrehozni. Néhány alkalommal olyan mélyen semmisültek meg a kozmikus behatolók az atmoszférában, hogy a robbanásuk során keltett lökéshullámok elsimították a felszínt egy kisebb területen. Csak az igazán nagy objektumok érik el a bolygó felületét, az eddig felfedezett kráterek közül a legkisebbek átmérője 3 km körüli. Sok olyan becsapódásos képződményt találni, amelyeknél a kőzetek megolvadtak, és a kráterekből radiálisan szétfolytak.

Vulkanizmus: a Vénusz felszínén rendkívül sok vulkanikus képződmény található, ezek nagysága az apró, néhány 100 méteres dómoktól egészen a hawaii Mauna Loa-val megegyező méretű hegyekig terjed, szerkezetük rendkívül változatos. A kis dómok a bolygón szinte mindenhol megtalálhatók, míg a tekintélyesebb pajzsvulkánok csak nagyobb, lokális kiemelkedések tetején. A magas felszíni hőmérséklet és a víz hiánya miatt valószínűleg nincsenek vagy csak nagyon ritkán fordulnak elő robbanásos kitörések. A megszilárdult lávafolyásokon többszáz km hosszú, de 1-2 km-nél sehol sem szélesebb kanyargó csatornák fedezhetők fel. Ezeket rendkívül viszkózus és gyors mozgású lávák alakíthatták ki, amelyek a légkör forrósága miatt sokáig olvadt állapotban maradtak.

Tektonika: A Vénusz nem sokkal kisebb a Földnél, jogosan feltételezhetjük, hogy bolygónkhoz hasonló belső hőtermeléssel rendelkezik. Ennek ellenére a Vénuszon nincsenek olyan lemezmozgások, mint Földünkön. Az égitest valószínűleg egykérű bolygó, ahol a kéregben támadó különböző erők gyűrnek, deformálják azt, de szét nem darabolják, mivel képlékeny állapotban van. Mindezek ellenére néhány olyan völgy is felfedezhető, amelyek falai a földi szubdukciós zónákhoz hasonló aszimmetriával rendelkeznek - eredetük azonban egyelőre tisztázatlan. A bolygó belsejében lévő gomolyáramlások egyes helyeken kinyomják a felszínt, majd amint a gomolyáramlás elhal, a terület visszasüllyed, és a függőleges mozgások hatására koncentrikus gyűrődések alakulnak ki a peremén. Ebből következik, hogy a Vénuszon a nagy kiemelkedéseknek valószínűleg nincsen izosztatikus gyökeik, hanem dinamikus folyamatok tartják fenn őket. Azokon a helyeken, ahol a gomolyáramlások lefelé veszik az útjukat, a kéreg összetorlódik. Itt feltehetőleg olyan gyűrődéses képződmények jönnek létre, mint például az Alfa Régió.

A hegységek nagyrésze vulkanikus eredetű, kisebb hányaduknál azonban olyan képződmények fedezhetők fel, amelyek összenyomó erők hatására alakultak ki. Ilyen összetett gyűrődéses szerkezettel rendelkezik például a 11 km magas Maxwell-hegység. Magának a hegységnek a léte jelenleg is aktív folyamatokra utal, az ugyanis „magára hagyva”, a viszkózus elernyedés következtében mintegy 10 millió év alatt elsüllyedne. Több jel is utal arra, hogy a bolygón napjainkban is működnek vulkánok - közvetlen bizonyítékkal azonban egyelőre nem rendelkezünk. Az erős vulkanikus aktivitás oka feltehetőleg az, hogy míg Földünkön a belső hő főleg lemezmozgások formájában szabadul fel, addig erre a Vénuszon vulkanikus folyamatok segítségével nyílik lehetőség.

Hold

A Hold bolygónk egyetlen nagyméretű, természetes kísérője. Átmérője közel negyede a Földének, így a Naprendszer hatodik legnagyobb holdja. Tömege 1,2%-a bolygónkénak. Átlagosan 27 földátmérőnyire kering bolygónk körül, 1 km/s-os sebességgel direkt irányban. 27,3 nap alatt tesz meg egy fordulatot, ezt nevezik sziderikus keringési időnek. Tengelyforgási

periódusa ugyancsak 27,3 nap, aminek következtében mindig ugyanazt az oldalát fordítja bolygónk felé - ezt nevezik kötött tengelyforgásnak. A valóságban felületének valamivel több mint felét tudjuk megfigyelni. Ennek egyik oka, hogy a Hold pályasíkja 5 fokos szöget zár be az ekliptikával, a Föld pályasíkjával, így időnként északi, időnként pedig déli pólusára látunk rá jobban - ez a szélességi libráció. A Hold tengelyforgása egyenletes, de földközelségben gyorsabban, földtávolban pedig lassabban halad pályáján. Így néha előresiet, máskor pedig kicsit lemarad, ezért néha keleti, néha nyugati oldalára látunk rá jobban - ez a hosszúsági libráció. A Hold librációs mozgásának következtében felszínének mintegy 59%-a figyelhető meg a Földről.

Kötött tengelyforgása csak a Földre vonatkoztatva áll fenn, a nappalok és éjszakák természetesen a Holdon is váltakoznak. Egy holdi nap a 27,3 napos tengelyforgási időnél valamivel hosszabb, mivel a Hold a Földdel együtt a Nap körüli pályán halad - azaz a Nap elmozdulni látszik a háttérsillagokhoz képest. Így ahhoz, hogy a Nap ismét deleljen a Hold egy adott helyéről nézve, még 2,2 napnak kell eltelnie - ez a Hold szinodikus keringési ideje. A Holdnak nincs saját fénye, a bolygókhoz hasonlóan a róla visszaverődő napfény teszi láthatóvá. A felszínét borító anyag fényvisszaverő képessége meglehetősen rossz, a ráeső fénynek átlagosan 7%-át veri vissza, hasonlóan pl. a hamuhoz. Ennek ellenére, mivel elég közel van hozzánk, a második legfényesebb objektum a Nap után. Újhold környékén - első negyed előtt és utolsó negyed után - az ún. hamuszürke fényt figyelhetjük meg rajta. Ez az árnyékos oldal enyhe derengése, amit a Földről a Holdra, onnan pedig ismét a bolygókra visszavert napfény hoz létre.

Belső szerkezet: A Hold több szempontból is aszimmetrikus égitest, belseje differenciálódott. Tömegközéppontja 3 km-rel közelebb van a Földhöz, mint geometriai középpontja, a kéreg vastagsága a Föld felőli oldalon 60 km körüli, a túloldalon kb. kétszer ekkora. Magja valószínűleg olvadt állapotban van, sugara 700 km körüli lehet.

Légkör: A Hold légköre rendkívül ritka, felszíni sűrűsége $10\text{--}20\text{ g/cm}^3$, a földi exoszférával mérhető össze. Eddig hélium és argon, valamint kálium és nátrium jelenlétét sikerült kimutatni benne. Ezeket az anyagokat részben a bolygóközi térből fogja be, részben pedig a mikrometeorit-bombázás hatására szabadulnak fel felszínéről. A légkör alakja leginkább egy üstököscsóvára hasonlít: a Nap felőli oldalon kétszeres, az ellentétes oldalon pedig nagyjából tízszeres holdátmérőig terjed ki. Jelentős atmoszféra hiányában nagy a napi hőingás: a nappali oldalon $+130\text{ }^\circ\text{C}$ -ig emelkedik a hőmérséklet, majd éjszaka $-160\text{ }^\circ\text{C}$ -ig süllyed. Mivel a talaj rossz hővezető, a hőingás csak a legfelső fél méteres rétegre van hatással, ám itt erős aprító tevékenységet fejt ki.

Felszín: A Hold szilárd felszínnel rendelkezik, melyet kráterek sűrűn borítanak. Felszíne már szabad szemmel is két különböző területre bomlik: a világosabb felföldekre (terra) és a sötétebb tengerekre (mare). A Föld felőli oldalon a tengerek aránya 30%, míg a túloldalon csak 3%, az egész felszínen 16,5%. A felföldek fényvisszaverő képessége a jobb, ezek képviselik a Hold ősi kérgét. Alacsony vastartalmú anortozitos összetételűek, magas földpát tartalmúak, alumíniumban és kalciumban gazdagok. Eredetileg kristályos formában léteztek, de a becsapódások során sokszor darabolódtak és újra összeolvadtak, így breccsa alakban találhatók. (Az anortozit földünkön nem túl gyakori ásvány. A Holdon valószínűleg azért található nagy mennyiségben, mivel égi kísérőnkön a környezet redukáló jellegű, hiányzik az ásványokat átalakító víz.) A kéreg vastagsága néhányszor 10 km lehet, kora 4,5 milliárd év körüli.

A tengerek a felföldeknél sötétebb területek, nagyméretű becsapódásos medencék talapzatát töltik ki. Nagy vastartalmú, kristályos szerkezetű bazaltok, a felföldeknél nagyobb sűrűségű

anyagok. A legnagyobb becsapódások átszakították a kérget, és az így keletkezett sebhelyeken ömlött a felszínre a láva, amely szétfolyt, kitöltötte a mélyedéseket. A tengerek területén gravitációs anomáliákat lehet kimutatni, amelyet a bennük elhelyezkedő nagytömegű és sűrűségű bazalt hoz létre. Ezeket masconoknak (mass concentration) nevezik. Létük arra utal, hogy a medencék feltöltődése akkor történt, amikor a holdkéreg már olyan szilárd volt, hogy nem jöhetett létre izosztikus kiegyenlítődés. A tengerek nem egyszerre keletkeztek, koruk 3,2-3,7 milliárd év közötti.

A felszín legfelső rétege a becsapódások, a napszél, a kozmikus sugárzás és a hőingás hatására laza, kötőanyag nélküli törmelékké alakult - ez a regolit. Vastagsága méteres, tízméteres nagyságrendű, a felföldeken vastagabb. Legfelső néhány centiméteres rétege por finomságú, szemcséi átlagosan 0,1-0,01 mm-esek. Ennek 25-30%-át üvegszerű gömbök alkotják, amelyek a meteoritbecsapódások alkalmával megolvadt és szétfröccsent anyag apró megfagyott cseppjei.

Medencék: Nagyméretű becsapódásos képződmények, feneküket sötét bazalt borítja. A becsapódás alkalmával felszabadult energia gyakran több koncentrikus gyűrűt alakított ki bennük. Ezek területén illetve környezetükben található a becsapódáskor kirobbant anyagtörmelék takarója, valamint az ekkor kirepült nagyobb testek által ütött másodlagos kráterek.

Kráterek: Becsapódásos képződmények, nagyságuk a cm-es mérettől egészen a 200 km-es átmérőig terjed. (Az ezeket kiváltó becsapódások kisebbek voltak a medencéket létrehozóknál.)

Thalasszoidok: Medence nagyságú mélyedések a felföldek területén, óriáskráterek. Méretük mare medencék nagyságrendjébe esik, fenekük azonban világos színű kéreganyagból áll, főleg a Hold túloldalán fordulnak elő. Létrejöttük oka, hogy a túloldalon vastagabb a kéreg, így a nagyobb becsapódások közül csak kevés tudta azt átszakítani, és a magmát a felszínre juttatni.

Sugársávok: A nagyobb, fiatal kráterekből sugárirányban szétágazó, többszáz km hosszú keskeny sávok, amelyek minden útjukba eső formáción áthaladnak. Általában világos árnyalatúak, csak magas napállásnál figyelhetők meg. Létük egyelőre nem tisztázott, vagy a becsapódások által kidobott anyagszemcsék alkotta vékony törmeléktakarók, vagy ugyancsak a becsapódások által kidobott anyag formálta apró kráterek milliói.

Vulkanikus képződmények: Legnagyobbak a becsapódásos medencék bazaltlávával feltöltött területei. Ezeken a helyeken nem alakultak ki vulkanikus hegyek, a köpenyből feltörő lávák laposan szétfolytak a mélyedésekben. Csak kis szintkülönbségek találhatók rajtuk: lépcsők, lávafolyások frontvonalai. A medencéket feltöltő vulkanikus tevékenység kb. 3 milliárd évvel ezelőtt ért véget.

A felszínen lávafolyások nyomai is láthatók: völgyek, csatornák, amelyek egykori láva-alagutak beomlott maradványai lehetnek. Akadnak szerkezeti mozgásokra utaló rianások is, ezek valószínűleg holdrengések alkalmával keletkeztek. (A Hold egyébként gyenge szeizmikus aktivitást mutat, a rengések ritkán érik el a Richter-skála szerinti 3-as értéket. A rengésfészkek átlagos mélysége 800-1200 km közötti.)

Az egykori vulkanikus tevékenység nyomait őrzik a dómok. Ezek kilométeres, illetve kisebb, lapos, kúp alakú kiemelkedések, tetőaknával a csúcson. A Hold napjainkra már vulkanikusan halott égitest. Egyes vidékein időnként felfényléseket lehet megfigyelni, amelyek valószínűleg gázfeltörések. Ezeket TLP (Transient Lunar Phenomena) rövidítéssel jelzik, felszíninformáló hatásuk elhanyagolható. A Hold egykori vulkanikus tevékenységéről még napjainkban is heves viták folynak, általánosan elfogadott álláspont nincsen.

A Hold keletkezését szintén nem ismerjük pontosan. Összetétele arra utal, hogy a Naprendszer belső területén alakult ki, de különbözik bolygónk összetételétől. Lehetséges, hogy a Földtől külön jött létre, és csak később állt bolygónk körüli pályára. Ugyancsak elképzelhető, hogy a Földdel együtt, annak környezetében keletkezett - azonban valamilyen inhomogén összeállítás során, amely eltérést hozott létre a két égitest anyagösszetételében. Összeállása után a kezdeti és a radioaktív bomlás során felszabadult hőtől belseje megolvadt és differenciálódott. Ekkor alakult ki a mag, a köpeny és az anortozitos kéreg, amelyet a későbbiekben a nagy meteorit-bechapódások néhol átszakítottak.

Mars

A Mars külső bolygósomszédunk, a Naptól számítva a negyedik nagybolygó. Enyhén elnyúlt ellipszispályán 1,5-szeres földtávolságban kerüli meg központi csillagunkat 687 nap alatt. Tengelyforgása direkt irányú, ideje közel áll a földihez: 24 óra 37 perc 23 másodperc. Átmérője 0,53-a, tömege egytizede a Földének. Forgástengelyének dőlésszöge a Földéhez hasonló: 25,2 fok a pályasíkra állított merőlegeshez képest, aminek következtében évszaks ciklusok váltakoznak rajta.

Belső szerkezet: Fémes magjának sugara 1600 km körüli, nem tudni, folyékony állapotban van-e, avagy már megszilárdult. Ezt veszi körül a nagyjából ugyancsak 1600 km-es köpeny, majd a kb. száz km vastag kéreg. Belsejének differenciálódása mintegy 3 milliárd évvel ezelőtt fejeződhetett be. A későbbiekben a belső hő következtében tágulás zajlott le, amely rendkívül aktívvá tette a bolygó felszínét. A köpeny kb. 1 milliárd évvel ezelőtt jelentősen hűlni kezdett, a vulkanikus aktivitás csökkent, a kéreg pedig vastagodott.

Légkör: Atmoszférája ritka, a felszíni légnyomás 3-13 millibar közötti. Fő összetevője a széndioxid, emellett kevés nitrogén, oxigén, szénmonoxid és vízgőz is található benne. A nappal és az éjszaka határvonalánál, főleg az egyenlítő vidékén a felszín felett 5-7 km magasan fehér felhők mutatkoznak. Ezek leginkább a földi hajnali ködökhöz hasonlítanak, valószínűleg vízgőzből állnak. (Felhők a nagy domborzati kiemelkedések környékén is gyakran megfigyelhetők.) Ugyancsak gyakoriak a sárga és vöröses árnyalatú fellegek, amelyek a felszínről felkapott porból állhatnak.

Időjárás: A bolygó forgástengelyének dőlésszöge a földihez hasonló, így a Marson is erős évszaks változások vannak, melyeket a pálya nagy elnyúltsága is jelentősen befolyásol. Amikor a bolygó napközben tartózkodik, a déli féltekén van nyár, a déli tavasz és nyár rövid forró, az őszi és a tél hosszú, hideg. A bolygó globális átlaghőmérséklete -60°C . Maximális nyári hőmérséklet délben az egyenlítő környékén $+20^{\circ}\text{C}$ körüli, de erős az éjszakai lehűlés, a legalacsonyabb eddig mért hőmérséklet -113°C . A marsi télnek elég sajátos megnyilvánulási formái vannak. Ahogyan csökken a hőmérséklet, a légköri széndioxidnak és vízgőznek mind nagyobb része fagy ki az atmoszférából, és a felszínt vékony fehér lepellel borítja be. Ennek következtében a napi átlaghőmérséklettel párhuzamosan a légnyomás is csökken, és a leghidegebb hetekben a légkör össztömegének 30%-a is kicsapódhat a dér formájában. A csapadék víz és széndioxid 6:1 arányú keveréke. A légnyomás napi ingadozásának mértéke 0,2 millibar körüli, oka ugyanaz, mint az évszakosnak. Mivel a Marson nincsenek óceánok, a felszín gyorsan reagál a beeső napsugárzás mennyiségének változására. Ennek következtében a Hadley-cellák (termikus cellák) is követik a Nap évi járását, és az egyenlítőtől 25 fokra is eltávolodhatnak. Olyan mértékű eltolódás is elképzelhető, hogy a bolygón átmenetileg csak egyetlen Hadley-cella alakul ki.

A felszínen általában gyenge szél fújdogál, olyan, amilyen Földünkön éppen csak megfodrozza a tavak víztükrét. A szélsébség azonban nem mindig ilyen kicsi, a Mars évszakos jelenségei közül ugyanis a porviharok a legfeltűnőbbek. Ezek többnyire a déli féltekén, a helyi tavasz és nyár alatt keletkeznek. A melegedő idő hatására gyorsan húzódik vissza a pólussapka, melynek pereménél a nagy hőmérséklet-különbség erős légörvényeket kelt. A légkörbe jutott por napfényt nyel el, aminek hatására felmelegszik, és tovább erősíti a szeleket, még több port juttatva a légkörbe. Ezek eleinte kis, lokális jelenségek, azonban ha a Hadley-cellákba bekerülnek, néhány nap leforgása alatt az egész bolygóra kiterjedő homokviharokká nőnek ki magukat. Ilyenkor teljesen részlet nélküli látványt mutat a Mars, csak a legmagasabb vulkánok lógnak ki a kavargó porból. A szélsébség a többszáz km/órát is eléri, és jelentős eróziós tevékenységet fejt ki. A por ilyenkor 40 km magasságig is feljut, és csak 3-4 hónap elteltével ülepszik le.

Felszín: A felszín lapos, szögletes sziklákból és homokdűnékből álló kietlen vidék. A bolygó általános vöröses színezetét az itt található vastartalmú anyagok, főleg vasoxid okozzák. A Marsot vizsgáló Viking-űrszondák a bolygó két távoli pontján szálltak le, mégis nagyon hasonló összetételű anyagot találtak. A Mars életének korábbi időszakában bizonyára folyékony formában is létezett víz a felszínen, ez a becsapódások vagy a vulkanikus hő hatására cirkulált a kőzetek között, és átalakította azokat. A különféle geológiai folyamatok révén ezek a kőzetek felszínre kerültek, ahol az eróziós hatások felaprózták, a porviharok pedig egyenletesen szétszórták a bolygón. A felszíni sziklák likacsos szerkezetűek, ami vulkanikus eredetre utal.

Pólussapkák: A Mars északi és déli pólusát sarki sapka fedi, ezek vízfagy és szárazfagy keverékéből állnak. A hósapkák mérete évszakos ingadozást mutat, a helyi nyár idején anyaguk részben a légkörbe párolog. Télen a légkör egy része kifagy a sapkákra, melyek ilyenkor a 45-50. szélességi fokig is lehúzódnak. Ezek a változások rétegesé tették a hósapkák anyagát, több és kevesebb poranyagot tartalmazó rétegek váltakoznak bennük. Ha a sapkában lévő vizet elolvasztanánk, az néhány méter mély óceánnal boríthatná be a bolygó felszínét.

Kráterek: A Mars felszínén a legidősebb vidékek egykorúak lehetnek a Hold tengereivel, azaz kb. 3,5 milliárd évesek. Az ennél korábbi krátereket a geológiai folyamatok eltüntették a bolygóról. Az É-i féltekén sokkal kevesebb a kráter, ezeket az ott elhelyezkedő vulkánokból származó láva törölte el - az északi féltekén ugyanis erősebb volt a vulkanikus aktivitás az utóbbi időkben. A kráterek erősen kopottak, ami jelentős erózióra utal. Sok kráter megjelenése alapján feltehető, hogy a becsapódás idején nagymennyiségű vizet tartalmazott a talaj. Ez eleve folyékony állapotban lehetett, vagy pedig a becsapódás hője hatására olvadt meg. Az ilyen kráterek peremén iszapfolyások láthatók.

Tektonika és vulkanizmus: a Mars felszínén nem találunk globális tektonikai aktivitásra utaló nyomokat. A bolygó kérge valószínűleg soha nem töredezett fel darabokra, bár a folyamat megkezdődött, ám nem fejlődött ki. Az egyetlen nagy tektonikai képződmény a hatalmas Valles Marineris, más néven Coprates-szakadék. Ez egy gigantikus méretű repedésvölgy, leginkább a Vörös-tengerre emlékeztet. Ahogyan az utóbbi Afrika és Arábia szétválásával alakult ki, a Valles Marieris alól a magma oldalirányba húzódhatott szét, minek hatására a kéreg besüppedt és feldarabolódott. A kanyonrendszer méretei tekintélyesek: szélessége átlagosan 120 km, mélysége 3-5 km közötti, hossza meghaladja a 4000 km-t, azaz felülmúlja a bolygó sugarát. Rendkívül összetett rendszer számos oldalággal, egymással párhuzamos, meredek falú völgyek találhatók benne. A kanyon fenekét homok borítja, falánál földcsuszamlások figyelhetők meg. Mindezek mellett temérdek kisebb repedés található a felszínen, melyek helyi elmozdulások következtében jöhettek létre.

A Mars jellegzetes képződményei közé tartoznak a vulkánok. A kráterek kor szerinti eloszlása a vulkánok előfordulásában is nyomonkövethető: az északi féltekén fiatalabb, a délin idősebb vulkanikus képződmények találhatók. A két legnagyobb vulkanikus vidék a Tharsis és az Elysium, melyek gyengén kráterezettek, felszínük mindössze néhány százmillió éves. A Tharsis-vonulat mintegy 4000 km átmérőjű vulkáni együttes, amely a legnagyobb ilyen képződmény a bolygón. A vulkanikus hegyeket tartalmazó fennsík több km-rel emelkedik a környező terület fölé. A régió négy legnagyobb vulkánja az Olympus-, Ascreus-, Pavonis- és Arsia Mons. Közülük az Olympus Mons a legtekintélyesebb, átmérője több mint 500 km, magassága 26 km körüli. Az Olympus Mons lejtőin található lávafolyások közül a legfiatalabbak elképzelhető, hogy mindössze tíz-százezer évesek. Az egész Tharsis-övezetben a kéreg jelentősen vastagabb, mint máshol - így képesek csak fennmaradni a nagytömegű vulkánok. Mivel a Marson nincsenek lemezmozgások, a vulkánok nem vándorolnak el a forró pontok fölé, így csak hatalmas pajzsvulkánok fejlődtek ki.

Folyómedrek, glaciális formációk: A Marson az alacsony légnyomás és hőmérséklet miatt nem létezhet víz folyékony állapotban. Felszínén mégis sok olyan képződményt, kiszáradt folyómedret találni, amely folyékony víz egykori jelenlétére utal. Az ilyen folyásnyomokat két fő csoportra lehet osztani. A magasabb helyekről lefelé tartó elágazó medrek olyan vízmosásokhoz hasonlítanak, amelyek száraz, homokos területen alakulnak ki egy zápor után. A Mars felföldjeibe belevágódott nagyobb, szélesebb medreket is találunk, ezek hasonlítanak legjobban a földi folyókhoz. A vízmosásnyomok kora nem azonos, 500 millió évestől egészen a több milliárd évesig terjednek. Eltérő koruk több nedves periódus létére utal a bolygó történetében. A leghosszabb meder 1500 km-es, a legszélesebb 200 km átmérőjű. A víz jelenleg a felszín alatt fagyott formában lehet jelen, erre utalnak azok a sokszögletű képződmények, amelyek a Földi poligon talajra hasonlítanak. Ezek a bennük található jég váltakozó megfagyása és felolvadása által keletkeznek. A jég pusztító munkájának nyoma szintén felfedezhető a Marson többszáz kilométer hosszú gleccservölgyek formájában.

Keresztmetszetük U alakú, akárcsak földi társaiké, mélységük alapján az egykori jégárak vastagsága 1-2 km lehetett. A völgyek környékén gyakran találni morénahalmokat.

A Mars körül két hold kering: a Phobos és a Deimos. Mindkettő kicsi, szabálytalan égitest, amelyek a bolygó egyenlítői síkjában, direkt irányban kötöttek keringenek. A Phobos egy krumpli alakú, 21x22x19 km-es szikladarab. Rendkívül sötét, sűrűsége a szenes kondrit meteoritokéhoz áll közel. Felszínét kráterek borítják, kora 3,4 milliárd év. Krátereinek és repedéseinek eloszlásában szabályszerűséget lehet felfedezni, melyek egy része egy hatalmas becsapódás alkalmával keletkezhetett. Az ekkor kidobott anyag a keringések során végigbombázta a felszínt látványos kráterláncokat hozott létre. (Mindezek mellett olyan barázdák is láthatók a Phoboson, amelyek réteges belső felépítésre utalnak.) A Deimos kisebb, 15x12x11 km-es, szintén sötét, a Phoboshoz hasonló összetételű lehet. Felszínét vastagabb porréteg borítja, mint a Phobosét, így korának megállapítása elég nehéz. Lehetséges, hogy a két kis égitestet a Mars az aszteroidaövből fogta be és tette holdjaivá - erre azonban egyelőre nincs bizonyíték.

Kisbolygók

A kisbolygó elnevezéssel azokat az égitesteket szokták illetni, amelyek a Föld-típusú bolygókhoz hasonló összetétellel rendelkeznek, de mégsem tartoznak ebbe az osztályba. Méretük a deciméteres, méteres nagyságtól a néhány száz km-es átmérőig terjed. Legnagyobb képviselőik alakja közel gömbszimmetrikus, a kisebbeké szabálytalan. Többségük a Mars és a Jupiter pályája közötti térségben található, ezt nevezik kisbolygó- vagy aszteroidaövnek. Pályájuk

általában elnyúltabb és nagyobb pályahajlású, mint a nagybolygóké, de azért az ekliptika síkjában mutatnak koncentrációt. Tengelyforgási idejük többnyire 4-20 óra közötti. Kis tömegük miatt légkörrel nem rendelkeznek, felszínüket kráterek borítják. Az eddig legalább egy alkalommal észlelt kisbolygók száma tízezer körüli, teljes számuk milliós nagyságrendű.

A kisbolygókat pályájuk jellemzői alapján különböző családokba lehet sorolni. Egy-egy család tagjai hasonló pályákon keringenek. Minden familia egy nagyobb, ősi szülőobjektum feldarabolódása által keletkezett. A közös eredetre a pályaelemek mellett felszínük fizikai jellemzői is utalnak. A családokon kívül egyéb csoportosulás is észrevehető a kisbolygóövben. Bizonyos zónáiban sokkal kevesebb kisbolygó található, mint amit közel egyenletes eloszlás alapján várnánk. Az ilyen üres tartományokat Kirkwood-réseknek nevezik, melyeket a Jupiter gravitációs zavaró hatása tisztított meg égitestektől. A kisbolygókat összetételük alapján két nagy csoportra lehet osztani: S és C osztályra. Az S osztályba tartozó kisbolygók főleg az aszteroidaöv belső részén találhatók, sok szilikátot, vasat tartalmaznak. A C osztály tagjai nagyrészt a kisbolygóöv külső részén helyezkednek el, összetételükre a szén alapú anyagok jellemzők.

A kisbolygók nem egy ősi, a Mars és a Jupiter pályája között létezett bolygó maradványai. A modern bolygókeletkezési elméletek rámutatnak, hogy Naprendszerünk korai évmillióiban itt is, megindult az anyag összeállása bolygócsírákká. Azonban a közeli Jupiter gravitációs zavaró hatása következtében a folyamat nem fejeződött be, és nem keletkezett belőlük nagybolygó. Több nagyobb méretű őskisbolygó alakult ki, amelyek azután kölcsönös ütközéseik során felaprózódtak, darabjaik szétterjedtek, és létrejött a mai aszteroidaöv. A kisbolygók tanulmányozása napjainkban egyre inkább előtérbe kerül, vizsgálatuk során kiderült, hogy gyakorlatilag a Naprendszer belső részének teljes egészét behálózzák. Sok közülük veszélyesen közel merészkedik bolygónkhoz, ezeket nevezzük földsúroló kisbolygóknak. Mivel számuk nagy, rendszeresen összeütköznek a Földdel. Kisebb képviselőik még a légkörben felrobbannak, a 10-20 méteresek illetve nagyobbak azonban a felszínt is elérhetik. Nagyságrendileg évente száz olyan légköri robbanás történik, melyek energiája legalább 1 kilotonna TNT robbanásakor felszabaduló energiával egyezik meg. Az ennél nagyobbak természetesen ritkábbak, néhány évente csak egy olyan akad, amelynek robbanása összemérhető a Hiroshimára ledobott atombombáéval. Az igazán nagyok emberi időskálán nézve csak elvétve fordulnak elő, a legutóbbi ilyen az az 50-70 méteres kisbolygó lehetett, amely 1908 nyarán a szibériai Köves-Tunguzka-folyó felett robbant. A kisbolygók apró méretük ellenére érdekes tulajdonsággal bírnak: előfordul, hogy kettős rendszereket alkotnak, de emellett több képviselőjük saját holddal is rendelkezik, van amelyikük pedig mágneses térrel. Számos kisbolygónál észleltek már gáz kibocsátást, és egyre valószínűbbnek tűnik, hogy az aszteroidák és az üstökösök osztálya között folyamatos átmenet van.

Jupiter

A Jupiter a Naprendszer legnagyobb bolygója. Átmérője 11,26 földátmérő, tömege 317,8 földtömeg, sűrűsége mindössze $1,3 \text{ g/cm}^3$. Az óriásbolygók prototípusának tekinthető, összetétele és szerkezete gyökeresen eltér a Föld-típusú bolygókétól. Felépítését hatalmas tömege és könnyű elemekből álló összetétele határozza meg. Tengelyforgási periódusa a nagybolygók között a legrövidebb, ennek következtében erős centrifugális erő lép fel az égitesten, amitől alakja lapult.

Belső szerkezet: Légköre hatalmas, mintegy 1000 km vastag lehet. Ez alatt található a folyékony állapotban lévő hidrogénréteg. (Valószínűleg nincsen éles átmenet a gáz és a folyékony halmazállapotú rétegek között.) Ez a hidrogénréteg 30 ezer km vastag, de alján már

akkora a nyomás, hogy a hidrogénmolekulák elektromosan vezető protonok és elektronok halmazára bomlanak fel. Ennek az anyagnak tulajdonságai sok tekintetben a fémekére emlékeztetnek, ezért folyékony fémes hidrogénnek nevezik. A középpontban fémeket és kőzeteket is tartalmazó, kb. 10 földtömegű mag helyezkedik el. A Jupiter nagyjából másfélszer annyi hőt sugároz ki, mint amennyit a Naptól kap, tehát saját hőtermeléssel rendelkezik. A fémes és molekuláris hidrogénrétegek találkozásánál a molekuláris hidrogén a fémesre lecsapódik, ez pedig térfogatcsökkenéssel jár. A Jupiter plusz hőtermelése így az égitest rendkívül lassú globális összehúzódásából származik, a bolygó sugara évenként nagyjából 1 milliméterrel csökkenhet. A légkör nagy hőkapacitása miatt nincsen napi hőingás.

Légkör: A bolygó atmoszférájában a hidrogén és a hélium a leggyakoribb elem. Az égitest légköre differenciálisan rotál, azaz az egyenlítő környékén gyorsabban fordul körbe, mint a sarkoknál. A pólusok környékén egy fordulat megtételéhez nagyjából 5 perccel több idő szükséges, mint az egyenlítőn. A légkör rendkívül színgazdag, a különféle árnyalatok különböző magasságokban elhelyezkedő, különböző összetételű felhőket jelentenek. A Jupiter képét az egyenlítővel párhuzamos felhősávok uralják, melyek a gyors tengelyforgás következtében rendkívül stabilak. A felszálló légáramlatok világosabb sávokat alkotnak, ezek teteje kb. 20 km-rel magasabban húzódik a zónákénál, amelyek sötétebb és hidegebb leszálló légtömegek. A gyors tengelyforgás miatt nagy Coriolis-erő lép fel, és ez viharos erősségűvé teszi a függőleges légmozgásokat. Az egyenlítő környékén egy hatalmas sáv található, amely felszálló légáramlatot képvisel, itt a szél keleti irányba fúj kb. 100 m/s-os sebességgel. Innen a pólusok felé közeledve csökken a szélesebbesség, és keleti illetve nyugati szelek váltják egymást az emelkedő illetve süllyedő légtömegeknek megfelelően. Lehetséges, hogy a földihez hasonlóan a beeső napsugárzás hozza létre őket, azonban vannak olyan jelek is, amelyek más folyamatokra utalnak. Az óriásbolygók légkörzésének vizsgálatakor az Uránusz bolygót szokták példaként felhozni. Az Uránusznál szintén az egyenlítővel párhuzamos szélrendszert lehet megfigyelni, azonban a bolygó forgástengelye gyakorlatilag a pályasíkban fekszik - tehát semmi köze sincs a beeső napfény mennyiségéhez. Egyes elképzelések szerint belső konvektív áramlások táplálják a légmozgásokat. A Jupiter felső felhőrétegeit ammóniakristályok alkotják, ezek alatt NH_4SH , majd vízjég kristályok találhatók, végül pedig folyékony vízcseppek.

A heves légmozgások miatt sok örvény alakul ki a légkörben, amelyek rövidebb-hosszabb élettartamúak, legismertebb közülük a Nagy Vörös Folt. Ez a képződmény a déli félteke 22 fokos szélességén található. Mérete változékony, hossza az eddigi megfigyelések alapján 26-48 ezer km, szélessége 10-15 ezer km között változott - azaz légköri örvény létre nagyobb Földünkénél. Élettartama rendkívül hosszúnak tűnik, első említése még az 1600-as évek közepéből maradt fenn. Színét és helyzetét lassan változtatja, nincs a bolygónak valamely pontjához rögzítve. Déli szélén kelet felé fújó 80 m/s-os, északi szélénél nyugat felé fújó 50 m/s-os szelek vannak. A foltban a gáz forgása az óramutató járásával ellentétes, belsejében az áramlások hatására spirális felhőszerkezet alakul ki, itt a rotáció periódusa 6 nap körüli. Egy állandósult anticiklonszerű, magasnyomású légköri zavar lehet.

A Jupiter rendkívül gazdag holdrendszerrel rendelkezik, jelenleg nyilvántartott holdjainak száma 16. Ezeket jellemzőik alapján több csoportba lehet osztani: a legfeltűnőbb együtttest a négy Galilei-hold alkotja, amelyek belső aktivitással rendelkező, nagyméretű égitestek. Külön csoportba lehet sorolni újabb négy holdat. Ezek átmérője 14-180 km közötti, pályájuk átlagosan 26 fokos szöget zár be a Jupiter egyenlítői síkjával, és egymáshoz közel keringenek. A harmadik ilyen különálló csoport szintén négy holdat tartalmaz. Átmérőjük 8-46 km közötti, és 21-24 ezer km távolság között retrográd irányban keringenek a bolygó körül. Paramétereik alapján a két utóbbi csoport égitestei egy-egy régebbi hold vagy befogott objektum töredékeiből állhat.

Az Io a legbelső a négy Galilei-hold közül, külső társaihoz képest nagy a sűrűsége, ami arra utal, hogy azoknál sokkal kevesebb vízjeget tartalmaz. Felszíne élénk narancssárga és vöröses színű, amit kén- és foszforvegyületek okoznak. Legfontosabb jellemzője a rendkívül erős vulkanikus aktivitás. Az Io felszínén becsapódásos krátereket egyáltalán nem találni, az aktív vulkanizmus ugyanis folyamatosan eltörli azokat. A felszín legnagyobb részét vulkanikus anyagtörmelékek, lerakódások borítják. Az eddig felfedezett vulkáni kúrtók és kitörési központok száma 300 körüli, a kalderák beomlásos eredetűek, átlagos méretük 40 km. Általában kör alakúak, teraszok találhatók bennük, peremük csipkézett, és hosszú, radiális láva-folyásokkal tarkított. A vulkánok közül eddig nyolc egyidejű működését lehetett megfigyelni. Mivel az égitest gravitációs tere gyenge és a kilövellési sebesség 1 km/s körüli, a vulkanikus felhők 200-300 km magasra emelkednek, anyaguk egy része pedig el is hagyja a holdat. A heves vulkanikus aktivitás oka a hold különlegesen nagy hőtermelése, ami a következő forrásból származik. Az Io az Európával 2:1 arányú pályarezonanciában van, azaz míg az Io kétszer kerül meg a Jupiter, az Európa pontosan egyszer teszi azt. A jelenség következtében az Európa igyekszik az Io pályáját elnyújtani, elliptikussá tenni. Az ellipszissé torzult pályán jupiterközelségben gyorsabban, jupitertávolban lassabban halad az égitest - tengelyforgása kötött, keringési sebessége viszont változó. Ennek következtében a Jupiter által az Ión keltett dagályhullám helyzete periodikusan eltolódik. Az Io alakja így bizonyos értelemben torzulásokat szenved, a köpeny anyaga a kéreghez sűrűsödik, a folyamat hőt termel. (Amennyiben az Io szilárd köpeny nélküli égitest lenne, az árapályerők hatására keletkező hullámok amplitúdója elérné a 100 méteres nagyságot.)

A vulkanikus aktivitás forrása tehát az árapályfűtés, hajtómotorja pedig nem a víz és a széndioxid, mint a Földön, hanem valószínűleg a kéndioxid. A szilárd szilikátokból és kénvegyületekből felépülő kéreg alatt folyékony kén és kéndioxid tavak létezhetnek. Ezek az árapályfűtésből származó hő miatt felmelegszenek, és a felszínre próbálnak törni. A szabadba jutott kéndioxid robbanásszerűen elpárolog, és repülése végén fagyott formában visszahullik a hold felszínére. A kéreg felső részében főleg kénvegyületek dominálnak folyékony és szilárd állapotban, alattuk szilárd kőzet található. Ez alatt helyezkedik el a folyékony szilikát köpeny, legbelül pedig a kőzetmag. Az Io légköre rendkívül ritka, inhomogén eloszlású, az aktív kitörési központok környékén sűrűbb. A vulkánkitörések által, valamint a Jupiter mágnetoszférájában található töltött részecskék bombázásának hatására sok anyag szabadul ki a hold felszínéről. Ezek egy hatalmas gyűrűt formálnak az óriásbolygó körül. Az Io ebben a főleg hidrogénből, kénből és nátriumból álló tóruszban kering. A hold napsütötte oldala felett ionoszféra alakul ki, amit a Jupiterrel egy hatalmas áramlási cső köt össze, ebben néhány milliós amperes áramok folynak.

Az Európa kifelé haladva a második nagy hold az Io után. Felszíne sima, óriási biliárdgolyóra hasonlít, a szintkülönbségek ritkán érik el a 100 métert. Anyagának kb. 20%-át vízjég alkotja, a többit kőzet. Krátereket alig látni rajta, felszínének legfeltűnőbb képződményei az egész égitestet átszelő repedések, rianások hálózata. A hold felszínét régen hatalmas óceán boríthatta, vékony jég réteggel a tetején. A későbbiekben, ahogy hűlt az égitest, ez a réteg elkezdett vastagodni, és az árapályerők, valamint a víz fagyásakor fellépő térfogatnövekedés hatására repedések keletkeztek rajta. Ezeket a belsőből kiáramló jég kitöltötte, és a földi befagyott tavakon kialakuló rianásokra hasonlító képződmények jöttek létre. Jelenleg az árapályerők hatására keletkező hő a felszín alatt 10 km-rel egy folyékony vízóceánt tart fenn, amelynek mélysége 75-100 km lehet, ez alatt húzódik az Európa kőzet belseje. A kráterek hiányát a relatíve képlékeny, és hő hatására megolvadó jégkéreg magyarázza.

A Ganymedes a Naprendszer legnagyobb holdja, mérete a Merkúrét is meghaladja. Anyagának mintegy fele kőzet, fele vízjég, melynek egy része a belsőben folyékony formában van.

Felszíne jelentős geológiai aktivitásról tanúskodik, két területtípust lehet megkülönböztetni rajta. A sötétebb, erősen kráterezett vidékek az idősebbek, gyakran szokták ezeket „kontinenseknek” nevezni. A világosabb részek a kontinensek közötti területeket töltik ki, melyeken gyakran a kontinentális vidékekkel párhuzamos barázdák figyelhetők meg, ezek kora 3-3,5 milliárd év. Itt is a hold lassú hűlésével együtt a jég megfagyásakor tágulás lépett fel. Ez felrepszította az eredeti kérget, és az egyes „kontinensek” (ősi kéregtáblák) lassan távolodni kezdtek egymástól. A közöttük keletkezett területet a belsőbből feltörő jég kitöltötte, így jöttek létre a barázdált világosabb területek. A felszíni kiemelkedések, akárcsak az Európánál, nem haladják meg az 1 km-t, mivel az ennél nagyobb tömegek alatt a jég lassan szétfolyik.

A Callisto a legkisebb sűrűségű a négy Galilei-hold közül. Kőzet és vízjég keverékéből áll, kérgének egy részében a víz itt is folyékony állapotban lehet jelen. Felszíne idős, sok kráter látható rajta. Legnagyobb becsapódásos képződményeit koncentrikus gyűrűk veszik körül, ezeket a becsapódás alkalmával megolvadt, majd gyorsan a jégbe fagyott hatalmas hullámok alkotják. A legnagyobb ilyen formáció átmérője mintegy 3000 km, amelyet 10-15 koncentrikus gyűrű vesz körül.

A Jupitert is, mint minden óriásbolygót gyűrűrendszer övez. A Jupiter gyűrűi elég szegényesek és sokkal kevésbé látványosak, mint a Szaturnusz hasonló képződményei. A gyűrűrendszer vastagsága nem több 30 km-nél, részecskéinek átlagos mérete 4 mikrométer körüli. Az eddig megfigyelt gyűrűrendszer három fő részre osztható, anyaga 58 ezer km távolságra kezdődik a Jupiter felszíne felett, és valószínűleg egészen a felhőig ér le.

Szaturnusz

A Szaturnusz a Naprendszer második legnagyobb bolygója. Átmérője 9,45 földátmérő, tömege 95,2 földtömeg. Sűrűsége mindössze $0,69 \text{ g/cm}^3$, így ha képzeletben egy hatalmas víztócsára helyeznénk, nem süllyedne el, hanem a tetején lebegne. Tengelyforgása szintén gyors, amelynek következtében alakja erősen lapult.

Belső szerkezet: Központjában egy 12 ezer km sugarú, főleg kőzetekből, ammóniából, metánból és vízből álló mag lehet. Ezt veszi körül egy 17 ezer km vastag fémes folyékony hidrogén köpeny, ezt pedig egy 30 ezer km vastag folyékony hidrogén réteg. A légkör vastagsága nagyjából ezer km. Ez a bolygó is több energiát sugároz ki, mint amennyit a Naptól kap. A plusz energia forrása a hélium és hidrogén lassú, fajsúly szerinti átrendeződése lehet.

Légkör: A Szaturnuszt is vastag felhőzet borítja, akárcsak a Jupitert, légköri képződményei azonban kevésbé látványosak. Atmoszférájában nincsenek akkora kontrasztkülönbségek és éles színárnyalatok, mint a Jupiterénél. Ennek oka, hogy a légkör hidegebb, így az egyes felhőrétegek mélyebben helyezkednek le, több gáz található felettük, ami erősen tompítja színüket. Az atmoszférát az egyenlítővel párhuzamos felhősávok uralják, a légkör itt is differenciálisan rotál, fő összetevője a hidrogén és hélium. A bolygón hevesebb szelek fújnak, mint a Jupiteren, a szélsébség az 400 m/s-ot is elérheti. Légkörében a Jupiteren megfigyelhető Nagy Vörös Folthoz és társaihoz hasonló örvények láthatók.

A Szaturnusz eddig ismert holdjainak a száma 17, holdrendszere rendkívül változatos. Kísérőinek anyaga nagyrészt vízjég és egyéb fagyott gázok, kisebb hányadban pedig kőzet. Jelentős belső aktivitással rendelkezett vagy rendelkezik még jelenleg is a nagyobb holdak többsége. Ennek hatására aktív területeiken a kráterek eltörlődtek, és hatalmas repedések, gerincek alakultak ki. A geológiai aktivitás oka itt is főleg a jéganyag megfagyása lehet, amely térfogatnövekedéssel járt. A holdak többsége kötötten kering a Szaturnusz körül, sokuknál fedezhető fel különbség a haladó és követő félteke színe, szerkezete között. Ennek oka olyan

törmelékanyag becsapódása lehetett, amely a Szaturnusz rendszeréből, valamelyik holdjáról származott. A kidobott anyagok egy irányban, lassan az óriásbolygó felé spiráloztak, és a holdak egyik féltekéje felsöpörte azt. Több kettős illetve hármas hold is kering a Szaturnusz körül, ahol ugyanazon a pályán több égitest található, a bolygóról nézve egymástól 60 fok távolságban mozogva. Két olyan égitest is létezik, amelyek pályáit mindössze 50 km választja el, és minden alkalommal, amikor egymás közelébe érnek (kb. 4 évenként), helyet, azaz pályát cserélnek.

A Szaturnusz legnagyobb kísérője a Titán, a Naprendszer második legnagyobb holdja, melynek mérete a Merkúr bolygóét is meghaladja. A holdat nagytömegű, sűrű, élénk narancssárga légkör borítja. Fő összetevője a nitrogén, emellett metán, argon és különféle szénhidrogének is jelentős mennyiségben előfordulnak benne. Felhői kb. 200 km-ig emelkednek felszíne fölé, különleges színüket szénhidrogén-vegyületek hozzák létre. A légkör tömege kb. tízszerese a földiének, felszíni légnyomása 1,5 atmoszféra körüli, a sűrű gázburok teljesen átlátszatlan. A Titán felszínén a hőmérséklet -180°C lehet. A hold atmoszférája a Földéhez hasonlóan nem az eredeti, első légkörében ugyanis még ammónia és metán dominálhatott. Ekkor a jelentős mennyiségű ammónia következtében az üvegházhatás sokkal erősebb volt, és -120°C -ig emelte a felszíni hőmérsékletet. Az ammónia az ultraibolya sugárzás hatására elbomlott, a hidrogén - könnyű elem lévén - megszökött, a légkör pedig kezdett nitrogénben feldúsulni. Az atmoszférában a metán ma is fotodisszociál a Nap ultraibolya sugarai hatására, és hosszúláncú szénhidrogén vegyületeket épít fel. A bomlás során keletkező hidrogén könnyen eltávozik a holdról, és hatalmas gyűrűként, tóruszként veszi körül a Szaturnuszt. (Nem összekeverendő a gyűrűrendszerrel.) A légkörben jelenlévő metán valószínűleg a felszínről kap állandó utánpótlást, ahol szilárd illetve folyékony állapotban lehet jelen. A radarmérések arra utalnak, hogy a Titánt nem egy folyékony metán óceán borítja, hanem az tavak, tengerek formájában található. Ezek a tengerek más szénhidrogénekben is gazdagok lehetnek. A szilárd területek alapzata vízjég, ammónia és metán keveréke lehet. A felszínen vastag, szerves anyagokból, aminosavakból álló réteg halmozódott fel a metán fotodisszociációja során keletkező állandó szervesanyag-eső hatására.

A Szaturnusz leglátványosabb képződménye a bolygó gyűrűrendszere. Ez a gyűrűrendszer nem merevtest, hanem sokmillió kis szemcséből áll, melyek mindegyike önálló pályán mozog az égitest körül. A holdak és a Szaturnusz gravitációs zavaró hatására az anyag nem egyenletesen oszlik el a korongban, hanem sűrűbb és ritkább sávokat alkot. A gyűrűrendszerben található objektumok mérete a méterestől egészen a mikronos nagyságig terjed, anyaguk nagy része valószínűleg vízjég. A gyűrűrendszer külső része rendkívül ritka, határa a Szaturnusz centrumától 480 ezer km távolság körül húzódhat. Sűrűbb tartománya a centrumtól 174 ezer km-re kezdődik, és 67 ezer km-ig tart, de ritkább anyag valószínűleg egészen a légkör tetejéig terjed. A gyűrűk vastagsága pontosan nem ismert, anyaguk nagyrésze egy vékony sávban összpontosul, melynek vastagsága 100 méteres nagyságrendű. A gyűrűk a felvételek felbontásáig finomszerkezetet mutatnak.

A rendszer csak első ránézésre szabályos, kisebb méretskálán sok elliptikus és szabálytalanul csavarodó, hullámos gyűrűalkotó található benne. Ezekért a nagyobb holdak és a Szaturnusz gravitációs hatásán kívül kisebb, ún. terelőholdak is felelősek, amelyek a gyűrűrendszerben illetve annak közvetlen közelében mozognak, és meghatározott pályán tartják az egyes gyűrűalkotók anyagát. A gyűrűrendszert egy hidrogénből álló „légkör” veszi körül kb. 60 ezer km-rel a gyűrű síkja alá és fölé terjedve. A legfényesebb gyűrűben, a B gyűrűkomplexumban időnként rövid életű küllőszerű képződmények figyelhetők meg, amelyek merevtestként, a Kepler-törvényeknek ellentmondva látszanak mozogni. Ezeket valószínűleg a Szaturnusz mágneses tere és a gyűrű mikronos szemcséi között létrejövő kölcsönhatás váltja ki, amely

kiemeli őket a gyűrű síkjából - tovaterjedésük a stadionok nézőterén hullámozó közönséghez hasonlítható. A gyűrűrendszer ideiglenes képződmény, amelynek anyaga a holdak feldarabolódása, anyagvesztése során állandó utánpótlást kap.

Uránusz

Az Uránusz a Naptól számított hetedik nagybolygó. Átmérője 4,11 földátmérő, tömege 14,52 földtömeg. Tengelyforgása a többi óriásbolygóhoz hasonlóan gyors, így alakja kissé lapult. Forgástengelye szokatlan helyzetű, 97,9 fokos szöget zár be a pályasíkra állított merőlegeshez képest, azaz szinte „gurul” pályáján. A forgástengely furcsa helyzetét valószínűleg egy gigantikus becsapódás hozta létre valamikor a bolygó múltjában. A nagy dőlésszög eredményeképpen a megvilágítás erősen változó, előfordul, hogy egy félteke hosszú éveken át egyáltalán nem kap napfényt.

Belső szerkezet: Szilárd anyagokat is tartalmazó magjának sugara 7 ezer km lehet, ezt veszi körül egy 16 ezer km-es, főleg vízből, valamint ammóniából és metánból álló köpeny, ez a bolygó teljes tömegének kb. kétharmadát alkotja. Sűrű légkör borítja, amelynek befelé haladva fokozatosan növekszik a nyomása, és lassan beleolvad a cseppfolyós köpenybe. Kisebb tömegű a Jupiternél és a Szaturnusznál, így kevesebb hidrogént és héliumot tudott megkötni kialakulásakor.

Légkör: Az Uránusz bolygó szürkés-kékes-zöldes, jellegtelen, kevés részletet mutató légkörrel rendelkezik. Atmoszférájának fő összetevője a hidrogén és a hélium, de emellett jelentős mennyiségű ammóniát és különféle szénhidrogéneket is tartalmaz. A metán a Nap ultraibolya sugárzásának hatására elbomlik, és hosszúláncú szénhidrogén-molekulák keletkeznek belőle. Ezek összefüggő szmogréteget alkotnak a felhők felett, amely eltakarja az alatta fekvő rétegeket - emiatt olyan részlet nélküli, szürkés az égitest képe. A szmogréteg alatt 40 km-rel kezdődnek a metán kristályokból álló felhők, mivel a metán fagy meg a legalacsonyabb hőmérsékleten, majd lefelé haladva ammónia- és vízfelhők következnek. A légkör differenciálisan rotál, a gyenge kontraszt ellenére az egyenlítővel párhuzamos felhősávok fedezhetők fel rajta. A forgástengely nagy dőlésszöge miatt a bolygón erősen változik a besugárzás nagysága. Ennek ellenére az egész Uránuszon közel azonos hőmérséklet uralkodik, nincsen sem napi, sem évszakos hőingás. A bolygó időjárásának kialakításában a fő szerepet (akárcsak a többi óriásbolygónál) sokkal inkább a belső tartományokból származó hő, mint a napsugárzás játssza. Ennek forrása az óriásbolygókra jellemző globális összehúzódás lehet.

Holdrendszer: Az Uránusz körül eddig 15 holdat fedeztek fel, ezek két csoportba oszthatók: a bolygóhoz közel keringő kis holdakra, és a távolabb található öt nagyobb objektumra. A belső tíz, többnyire szabálytalan alakú hold átmérője 170 km-nél kisebb. Sötét színük arra utal, hogy külső társaikhoz képest kevesebb jeget tartalmaznak. Az öt távolabbi hold lényegesen nagyobb, ezek sorrendben: Miranda, Ariel, Umbriel, Titania és Oberon. A legbelső kivételével 1100-1600 km közötti átmérőjűek, alakjuk gömbszimmetrikus. Anyaguknak nagyjából a fele jég, fele kőzet, légkört egyiküknél sem sikerült kimutatni. Felszínükön sok becsapódásos kráter található, az idősebb területek kora 4 milliárd év körüli. Ezek mellett hatalmas, az égitestek geológiai aktivitását bizonyító fiatalabb képződmények is felfedezhetők. Ezek a törésrendszerek és gerincek - mint már korábban említettük - akkor keletkezhetnek, amikor a holdak belseje szilárdra fagyott, és a fagyáskor a jég kitágult. Ez felrepesztette a kérget, és a belsőtől az anyag a felszínre jutott, ahol változatos formációkat hozott létre.

Az Uránusz rendszerében a 480 km átmérőjű Miranda az egyik legérdekesebb hold. Két, egymástól gyökeresen eltérő területtípus látható felszínén. Az egyik típusba erősen kráterezett,

enyhén hullámos vidékek tartoznak - ezek az idősebbek. A másik csoportot egy központi területből és az azt körülvevő rendkívül sűrű, változó fényvisszaverő képességű gerinc- és völgyrendszerből álló régiók alkotják - ezek a fiatalabbak. Ezenkívül hatalmas törések tagolják az egész égitestet, melyek egy része a sávos területek előtt, egy része pedig azok kialakulása után keletkezett. A felszíni képződmények kialakulására két elgondolás született. Az egyik szerint a Miranda, bizonyos értelemben „kifordult önmagából”. A hold belsejét a kezdeti hő és a radioaktív bomlás által felszabadult hőmennyiség annyira felmelegítette, hogy ott megindult a differenciálódás. Röviddel ezután katasztrofálisan ütközött egy nagyméretű aszteroidával, amely több darabra törte szét az égitestet. A töredékek azonban nem távolodtak el messzire egymástól, és ismét felépítették a Mirandát. Egyes darabok az eredeti elhelyezkedésüknek megfelelően tértek vissza, mások viszont fordítva: sötétebb köpeny részükkel kifelé. A különböző darabok összeforrásával létrejöttek a felszínen ma megfigyelhető bizarr formációk. (Ehhez hasonló katasztrofális széttörés egyébként a többi holdnál is előfordulhatott életük legelején. A Miranda többször is szétdarabolódhatott, és felszíne a legutóbbi ilyen esemény nyomait őrizheti.) A másik elgondolás szerint a képződmények belső erők hatására alakultak ki. A radioaktív bomlás, valamint az árapályerők által fűtött égitestben a viszkózus jeges anyagok konvektív mozgásba kezdtek, és a felszínre érve alakították ki a formációkat. Akár-csak a Szaturnusz holdak esetében, itt is két bombázási korszakra utal a kráterek eloszlása. Az első, a nagy bombázási időszakkal esik egybe, amikor Naprendszerünk kezdeti évmillióiban, nagyméretű testek csapódtak a holdak felszínébe (l. a „A Naprendszer keletkezése” című részt). A következőben kisebb részecskék vettek részt, ezek az Uránusz-holdak esetleges vulkanikus tevékenysége alkalmával kidobott anyagból és a holdak széttörése valamint összeállása után maradt törmelékekből álltak.

Az Uránusz gyűrűrendszere a bolygó centrumától 41-51 ezer km közötti távolságban húzódik. Mérete és anyagsűrűsége messze elmarad a Szaturnuszétól. A gyűrűk szélességükben és átlátszóságukban váltakoznak hosszuk mentén, ez a szabálytalanság leginkább a Neptunusz hullámos gyűrűire hasonlít. Anyaguk sötét, a belső tíz hold anyagára emlékeztet. A sötét színt valószínűleg a magnetoszféra részecskéinek folyamatos bombázó hatása alakítja ki, amely a metánt lebontja, és lehetőséget teremt hosszúláncú szénhidrogének keletkezésére. Ezek sötét réteget vonnak a testek felszínére. A rendszert többségében elég nagy, kb. méteres részecskék alkotják. A gyűrűk portartalma kicsi, valamilyen folyamat ugyanis állandóan megtisztítja őket az apró részecskéktől. Ez egyrészt lehet a bolygó külső hidrogén halojának súrlódása révén kifejtett fékező hatás. Létrehozhatja emellett az Uránusz magnetoszférája is, amely a töltéssel rendelkező testek mozgását befolyásolja - mindkettő következtében az apró részecskék spirális pályán a légkörbe hullanak. Az eddigi megfigyelések csak két terelőholdat találtak (ezek tartják keskeny sávban az egyik gyűrű anyagát), de sok hasonló létezhet még a gyűrűrendszerben, illetve annak közvetlen közelében.

Neptunusz

A Neptunusz a Naptól kifelé haladva az utolsó óriásbolygó. Átmérője 3,86 földátmérő, tömege 18,22 földtömeg. Kék színű gázóriás, sok tekintetben belső társához az Uránuszhoz hasonlít. Tengelyforgása gyors, 15 óra körüli, aminek következtében alakja lapult. Forgástengelye a keringési síkra állított merőlegessel 28,8 fokos szöget zár be. Belső felépítése jelenlegi ismereteink szerint nagyon hasonlít az Uránuszéra.

Légkör: Sokak szerint a Neptunusz a Naprendszer egyik legszebb égiteste. A bolygóról készült felvételeken elsőként annak élénk kék színe tűnik a szemünkbe. Ezt a felső légrétegek magas metántartalma hozza létre, amely főleg a vörös fényt nyeli el, és a kék, zöldet veri vissza.

Kevesebb hosszúlancú vegyület, azaz kevesebb szmog van a légkör felső részében, mint az Uránusznál - ezért ilyen élénk a felhőzet színe. A szmog hiányát valószínűleg erős függőleges légáramlások okozzák: az emelkedő gáztömegek lehűlnek, jég kondenzálódik ki belőlük a környezetükben található anyagokra (hosszúlancú vegyületekre), és azokat a mélybe húzzák. A Neptunusz légköre differenciáltan rotál, belső társaihoz hasonlóan óriási légörvények láthatók atmoszférájában. A Jupiter Nagy Vörös Foltjára emlékeztető képződmény a Neptunusz Nagy Sötét Foltja, melynek mérete 16 ezer km körüli, de emellett még sok hasonló légörvényt is megfigyeltünk. Feltűnő, rendkívül gyors változásokat mutató fehér felhők is láthatók a légkörben. Ezek az ütköző légtömegek határán jönnek létre, ahol a gyorsan emelkedő gázban jég kondenzálódik ki, a süllyedéskor pedig felmelegszik és elpárolog.

Holdrendszer: A Neptunusz közelében hat kis szabálytalan alakú hold kering, ezek átmérője 60-400 km közötti. Sötét objektumok, fényvisszaverő képességük a Mars két holdjára emlékeztet, anyaguk a Neptunusz gyűrűinek anyagához állhat közel. Ezután következik a Triton, majd a legkülső hold, a Nereida. Ez utóbbi elég messze: átlagosan 5,5 millió km-re, elnyúlt pályán kering a kék gázóriás körül, egy évenként megkerülve azt. Átmérője 340 km, valószínűleg befogott égitest.

A Triton a Neptunusz legnagyobb kísérője és a Naprendszer hetedik legnagyobb holdja. Átmérője 2720 km, hat nap alatt kerüli meg a Neptunuszt, a többi holddal ellentétes, retrográd irányban. Pályahajlása 160 fokos, valószínűleg ez is befogott égitest. Szilikátok, vízjég- és széntartalmú anyagok építik fel, belső szerkezete differenciálódott. A felszín főleg fagyott nitrogénből és metánból áll, ezenkívül szénmonoxidot, széndioxidot és még számos szénhidrogén-vegyületet tartalmaz. Az egyenlítői övezetekről a napfény hatására a metán- és a nitrogénjég elpárolog, a pólusokon pedig kicsapódik, nagyméretű pólussapkát létrehozva. Légköre nagyon ritka, főleg nitrogénből, valamint metánból és egyéb szénhidrogénekből áll, amelyek által halvány rózsaszínes árnyalatú. Felszínén nagyméretű fagyott lávavakokat találni, vulkanizmusa azonban eltér a földitől. Az itt található lávák olyan anyagokból állnak, amelyek a víz fagyáspontja alatt is folyékonyak maradnak, így kevés belső hő is elegendő a vulkanikus tevékenység kiváltására. (Ez a többi óriásbolygó holdjaira is általánosítható.) Felszínén hosszú repedéseket és sokszögletű töredezett régiókat is találni, amelyek valószínűleg a láva felszín alatti mozgásának hatására alakultak ki. Feltűnő képződmények továbbá a pólussapkákon megfigyelhető sötét sávok, melyek gejzírek porlerakódásai lehetnek - ezek napjainkban is működnek a holdon. Energiájukat a belsőből és/vagy a gyenge napfényből szerzik. A felszíni áttetsző jégréteg átengedi a napsugarakat, amelyek mélyebben elnyelődnek, és melegíteni kezdik az ott található anyagot. A gáznyomás fokozatosan nő, míg végül áttöri a felszínt. A gejzír kitörése port is magával ragad, ami a lassú tritoni légkörzés hatására a szélárnyékos irányban lerakódik, és létrehozza a sötét sávokat.

A Neptunusz gyűrűrendszerének sajátos megjelenése van. A gyűrűk összefüggő objektumoknak tűnnek, mint a többi óriásbolygónál, azonban feltűnő csomók, vastagabb és vékonyabb szakaszok váltakoznak bennük. A gyűrűk portartalma rendkívül nagy, így hátsó megvilágításban látszanak a legjobban. (A sok por valójában egy lapos korongot formál a bolygó körül, amely túlterjed a gyűrűrendszer határain.) A nagymennyiségű por magyarázata a gyűrűt alkotó testek egymással történő ütközésében keresendő, ami legjobban az Adams-gyűrűnél figyelhető meg. Ennél a gyűrűnél nem sokkal beljebb kering a Galatea nevű hold. A kis égitestnek gravitációs hatása hullámokat kelt a gyűrűben, amelyek a Galatea pályamenti sebességével haladnak körbe. Mivel a hold közelebb van a Neptunushoz, mint a gyűrűk, ezért gyorsabban kering azoknál. A hullámok így előre haladnak a gyűrűben az anyagot megmozgatva, gyakori ütközéseket kiváltva. Itt is találhatunk terelőholdakat: a hat belső hold közül négy a gyűrűk

között kering. A gyűrűk anyagában megfigyelt további szabálytalanságok még ismeretlen, az eddigieknél kisebb terelőholdak, illetve nagyobb törmelékdarabok létére utalnak.

Plútó-Charon

A nagybolygók sorából a Plútó, a kilencedik bolygó kilóg. Nagy naptávolsága alapján az óriásbolygók közé kellene sorolnunk, átmérője azonban mindössze 2280 km, tömege 0,0025 földtömeg. Pályája ugyancsak rendhagyó: az összes bolygónál elnyúltabb és 17 fokos szöget zár be az ekliptika síkjával. (Annyira elnyúlt, hogy napközelen beljebb van a Neptunusznál.) A Plútó holdját 1978-ban fedezték fel, és a Charon elnevezést kapta - a későbbi vizsgálatok azonban rámutattak, hogy valójában nem is bolygóról és holdjáról van szó, hanem egy kettős bolygóról. A Charon átmérője mintegy fele, tömege pedig egytizede a Plútóénak, melytől átlagosan 19600 km távolságban kering. A két objektum mozgása egymáshoz viszonyítva kötött. A Plútó 6,39 nap alatt fordul meg a tengelye körül, a Charon pedig ugyanennyi idő alatt kerüli meg őt, így a Charon a Plútó egének mindig ugyanazon a pontján látszik. (Valószínűleg a Charon tengelyforgása is kötött, így a két égitest abszolút mértékben farkasszemet néz egymással.)

Belső szerkezet és légkör: A Plútót sűrűsége alapján 60-70%-ban szilikát alkotja, amelyet egy fagyott vízburok övez egyéb fagyott gázokkal egyetemben. Felszínének nagyrésztét valószínűleg nitrogénjég borítja. A Charon sűrűsége még kisebb, így ennek az égitestnek a nagyrésze vízjégből állhat. A Plútónál sikerült légkört is kimutatni, ám ez az atmoszféra évszakos jellegű. Amikor a bolygó napközelen tartózkodik, a felszínét érő napsugárzás intenzitása megnő, és az ott található anyagok szublimálni, párologni kezdenek. Fokozatosan kialakul ritka és nagyterjedésű légköre, melynek fő összetevője nitrogén, ezenkívül metán és szénmonoxid is található benne. A felszíni légnyomás 3 mikrobár körüli, ami megfelel a Föld légkörében 80 km-es magasságban uralkodónak. A Charon felszíne szürkés színű, légkörrel valószínűleg nem rendelkezik. A Plútó vöröses, poláris területeit sapkaszerű képződmények fedik, sok tekintetben a Neptunusz Triton nevű holdjára hasonlít. Valószínűleg a Kuipre-öv egyik legnagyobb objektuma, amely bizonyos szempontból az üstökösök és a nagybolygók közötti átmeneti égitestnek is tekinthető.

A nagy bolygók pályaelemei

Bolygó	Átlagos naptávolság millió km	Átlagos naptávolság CS.E	Keringési idő (nap)	Pályamenti seb (km/s)	Excentricitás	Inklináció
Merkúr	57,9	0,387	87,969	47,89	0,2056	7,00
Vénusz	108,2	0,723	224,701	35,03	0,0068	3,39
Föld	149,6	1,0	365,256	29,79	0,0167	0,0
Mars	227,9	1,524	686,980	24,13	0,0933	1,85
Jupiter	778,3	5,203	4332,589	13,06	0,048	1,31
Szaturnusz	1427,0	9,539	10759,22	9,64	0,056	2,49
Uránusz	2869,6	30,061	30685,4	6,81	0,046	0,77
Neptunusz	4496,6	19,191	60189	5,43	0,010	1,77
Plútó	5900	39,529	90465	4,74	0,248	17,50

A belső bolygók fizikai adatai

	Merkúr	Vénusz	Föld	Mars
Egyenlítői sugár (re) (km)	2,439	6,051	6378,14	3,394
Poláris sugár (rp) (km)	2,439	6,051	6356,775	3,372
Lapultság (re-rp)/re	0,0	0,0	0,003353	0,0074
Egyenlítői sugár (Föld=1)	0,382	0,949	1,0	0,533
Tömeg (földtömeg)	0,05527	0,81499	1,0	0,10745
Átlagos sűrűség (g/cm ³)	5,43	5,25	5,52	3,93
Albedo	0,06	0,76	0,39	0,14
Tengelyforgási idő (nap illetve óra:perc)	58,6462	243,01	23:56	24:37
Forgástengely hajlásszöge a pályasík pólusától (fok)	7,0	177,4	23,45	23,98
Szökési sebesség az egyenlítőn (km/s)	4,25	10,36	11,18	5,02
Ismert holdak száma	0	0	1	2

A külső bolygók fizikai adatai

	Jupiter	Szaturnusz	Uránusz	Neptunusz
Egyenlítői sugár (re) (km)	71,492	60,268	25,559	24,764
Poláris sugár (rp) (km)	66,854	54,364	24,973	24,341
Lapultság (re-rp)/re	0,06487	0,09796	0,02293	0,0171
Egyenlítői sugár (Föld=1)	11,19	9,46	3,98	3,81
Tömeg (földtömeg)	317,894	95,184	14,537	17,132
Átlagos sűrűség (g/cm ³)	1,33	0,71	1,24	1,67
Albedo	0,67	0,7	0,5	0,84
Tengelyforgási idő (óra:perc:másodperc)	9:55:30	10:39:22	17,24	16,11
Szökési sebesség az egyenlítőn (km/s)	59,54	34,49	21,29	23,71
Forgástengely hajlásszöge a pályasík pólusától (°)	3,08	26,73	97,92	28,8
Ismert holdak száma	16	17	15	8

A Plútó-Charon rendszer adatai

Plútó sugara	1140 km
Plútó tömege	0,0025 földtömeg
Átlagos sűrűsége	2,1 g/cm ³
Plútó albedója	0,14
Charon sugara	590 km
Charon tömege	0,0002 földtömeg
Átlagos sűrűsége	1,4 g/cm ³
Keringési távolságuk	19600 km
Tengelyforgási és keringési idejük	6,39 nap

Üstökösök

Az üstökösök a Naprendszer egyik leglátványosabb égitesttípusát alkotják. Annak ellenére, hogy időnként rendkívül feltűnőek, valójában kisméretű, nehezen megfigyelhető, sötét objektumok. Csak a Nap közelében tündökölnék látványosan, központi csillagunktól távol az észrevétlenség homályába burkolóznak.

Az üstökös lelke az üstökösmag. Ez egy km-es, néhány tíz-száz méteres objektum, szén, szilikát és egyéb szilárd szemcsékből áll, melyeket nagy mennyiségben jelenlévő fagyott gázok ragasztanak össze (főleg vízjég, ammónia, metán, széndioxid, szénmonoxid). Több szempontból is a kisbolygókra hasonlítanak, azoktól csak naptávolságban és összetételben különböznek. (A kisbolygók tulajdonképpen a Naprendszer belső területén kialakult „száraz üstökösmagoknak” tekinthetők. Az utóbbi évtizedek kutatási eredményei arra utalnak, hogy a két égitest-típus között nehezen húzható határ, átmeneti objektumok is léteznek.) Az üstökösmagok az óriásbolygókon túl találhatók, és egy hatalmas felhő formájában veszik körül a Naprendszert. Életük nagyrészt ebben az üstökösfelhőben töltik, ekkor halvány, inaktív égitestként keringenek a Nap körül. Csak akkor válnak feltűnővé, és nyerik el közismert megjelenésüket, amikor pályájukon központi csillagunk közelébe érnek. Az őket érő egyre erősebb napsugárzás hatására felmelegszenek, és a felszínükön található anyag szublimálni, párologni kezd. Mivel egy ilyen kis égitestnek nincs számottevő gravitációs tere, ezért légkörének gázai szabadon távozhatnak, és így nagyméretű, diffúz gázburkot alkotnak körülötte - ezt nevezik kómának, vagy fejnek. A kómát alkotó gázmolekulák és atomok a napsugárzás hatására egyszerűbb molekulákká, atomokká, ionokká disszociálnak. A kóma gázanyaga kölcsönhatásba lép a Nap sugárnyomásával és a napszéllel. A Nap sugárnyomása a kis porszemcsékre a Nappal ellentétes irányú erővel hat, amelyek így a Nappal ellentétes irányba mozdulnak el. A fénynyomás hatására lemaradt porszemcséknek a hosszú, enyhén görbülő sorát nevezzük porcsóvának. Az ioncsóva ionizált részecskékből áll, amelyeket a napszél töltött részecskéi ragadnak magukkal, ezek alkotják az egyenes ioncsóvát. (A csóvák hossza akár a több millió kilométert is elérheti.) Minden egyes napközelség alkalmával az üstökös tehát anyagot veszít, így egy idő után fokozatosan elfogy. (Az anyagvesztés mértéke sok tényezőtől függ, a Föld távolságában általában másodpercenként tonnás nagyságrendű.) Az üstökösök anyagvesztésük révén nagy mennyiségű port szórnak szét pályájuk mentén, ezek a portömegek alkotják a meteorrajokat. (Meteorrajokat ezek mellett kisbolygók is létrehozhatnak.)

A Naprendszer telis-tele van ilyen apró porszemcsékkel, ezeket nevezzük meteoroidoknak. Amikor egy ilyen részecske a Föld légkörébe belép, nagysebességgel ütközik az atmoszféra atomjaival, molekuláival. Ennek hatására felizzik, és anyaga porladni kezd. Fénykisugárzásra gerjeszti a levegőt útja mentén és saját anyaga is sugározni kezd - ezt látjuk fényes meteorként vagy népiesebb nevén hullócsillagként. Ha a test nem ég el teljesen, a földet érő darabját nevezzük meteoritnak.

Az üstökösök pályája rendkívül elnyúlt. Két csoportra osztjuk őket: rövid- és hosszúperiódusú üstökösökre. (A két csoport közötti határvonal meghúzása önkényes.) A hosszúperiódusú üstökösök keringési ideje 200 évnél nagyobb, a Naptól messzire eltávolodnak, életük nagyrészt a bolygók térségén kívül töltik. Pályahajlásuk eloszlása véletlenszerű, nem mutatnak koncentrációt az ekliptika síkjában, az Oort-felhőből származnak. A rövid periódusú üstökösök keringési ideje 200 évnél rövidebb, ezek életük nagyrészt a bolygók közötti térségben töltik. Pályahajlásuk erős koncentrációt mutat az ekliptika síkjában, valószínűleg a Kuiper-övből származnak. Naptávolságuk egy-egy bolygópályánál halmozódnak, főleg az óriásbolygókénál. Ennek oka, hogy a nagytömegű bolygók gyakran változtatnak a fősíkban keringő üstökösök pályáin és keringési idejükön.

Üstökösfelhők a Naprendszer külterületén

A nagybolygók a Naprendszernek csak egy belső, szűk térrészét foglalják el, a távolabbi térségét óriási számban töltik ki kisebb égitestek: üstökösök. Amint a Plútó után kifelé haladunk a Naprendszerben, sok apró, kilométeres, méteres égitestet találunk. Ezek az üstökösök az ekliptika síkjában csoportosulnak, bár pályahajlásaik szórása sokkal nagyobb, mint a nagybolygóké. Ezt a kiterjedt, gyűrű alakú zónát nevezik Kuiper-övnek, amely a Neptunusz környékén kezdődik és néhány száz, ezer Cs.E.-ig terjed ki. Tagjai olyan kis jeges objektumok, amelyek a Plútó pályáján túl alakultak ki, de nem álltak össze nagyobb bolygóvá. Tízezer, százezer képviselőjük lehet. (Feltehetőleg ez a zóna a forrása a rövidperiódusú üstökösöknek.) Néhány Kuiper-objektum a Naprendszer belső részein is megtalálható: ilyen lehet a Szaturnusz és az Uránusz között keringő 160 km-es Chiron, a Szaturnusz Phoebe, a Neptunusz Triton és Nereida nevű holdja - amelyek jellegükben, pályájukban élesen elütnek társaiktól. Ugyancsak két, az átlagosnál nagyobb Kuiper-objektumként értelmezhető a Plútó-Charon rendszer is. A távoli Kuiper-objektumok felfedezése a műszertechnika gyors fejlődése következtében napjainkban kezdődött meg, e sorok írásakor 13 képviselőjét ismerjük.

A Kuiper-öv után kezdődik az Oort-felhő, amely néhány ezer és 200 ezer Cs.E. közötti távolságban veheti körül a Napot. Kilométeres, méteres üstökösökből áll. A felhő belső része enyhe sűrűsödést mutat az ekliptika síkjában, itt található az üstökösök többsége (Hills-felhő). A külső régió a nagyobb térfogatú, itt viszont kevesebb mag helyezkedik el, ezek gömb alakban veszik körül a Naprendszert. Az Oort-felhőt alkotó jeges üstökösök a Naptól nagy távolságban teljesen inaktívak. A Naprendszer kialakulásakor lökődtek ki az óriásbolygók gravitációs hatása által, számuk százmilliárdos nagyságrendű, össztömegük elérheti az Uránusz vagy Neptunusz tömegét. Létezésüket közvetlen bizonyítékkal egyelőre nem tudjuk alátámasztani, mivel nagy távolságuk és kis méretük miatt még műszereink érzékenységének határa alatt vannak. Közvetett bizonyíték létezésükre a hosszúperiódusú üstökösök pályái, amelyek ebből a felhőből tévednek a Naprendszer belső részeire. Napunkon kívül sok csillag körül találtak már porgyűrűket, amelyek az Oort-objektumok törmelékéből, poranyagából állhatnak.

Bolygóközi anyag

A bolygóközi (interplanetáris) anyag kifejezés alatt azt a ritka anyagot értjük, amely a Naprendszerben a bolygók közötti térségben található. Két fő összetevőre bontható: bolygóközi gázra és porra.

Bolygóközi gáz: főleg ionizált hidrogénből és héliumból, azaz protonok, elektronok és alfa részek elegyéből áll. Ennek fő forrása a Nap, ahonnan nagysebességgel áramlanak kifelé. A gáz nagyrésze ionizált állapotban van, ezt szokták napszélnek nevezni, amelynek intenzitása a Nap aktivitásának megfelelően változó. A plazma elektromos vezetőképessége révén mágneses teret is visz magával, ez hozza létre az interplanetáris mágneses teret.

Bolygóközi por: nagy, lapult ellipszoid alakban veszi körül a Napot, szimmetriasíkja az ekliptika. Tulajdonképpen a kisbolygók, üstökösök és a kis porszemek között folyamatos az átmenet, a méretskála minden részén találunk szilárd testeket, ez a porfelhő főleg 0,1-0,001 mm-es szemcsékből áll. A porszemcséken szóródó napfényt szabad szemmel is meg lehet figyelni, mint halvány derengést az ekliptika síkjában, ezt nevezik állatövi fénynek. A nagyobb porszemcsék látványos meteorjelenséget válthatnak ki bolygónk légkörében, míg a kisebbek észrevétlenül hatolnak be a Föld atmoszférájába, és keverednek el azzal. A Föld felszínére

hulló bolygóközi por mennyisége 100-1000 tonna naponta. Annak ellenére, hogy a bolygók a por jó részét felsöprik, az üstökösök és kisbolygók anyagából állandó utánpótlást kap.

A napszél a naptevékenységtől függően nagyságrendileg 10^4 Cs.E. távolságban találkozik a csillagközi anyaggal, itt egy lökeshullámfront keletkezik. A rendszer határát nehéz meghúzni, ugyanis ezen a lökeshullámfronton kívül is találhatunk üstökösmagokat - így általában a két fényéves távolságon belül elhelyezkedő objektumokat szokták a Naprendszer tagjának tekinteni.

A Naprendszerben lévő égitestek egyidőben, egyazon folyamat révén alakultak ki egy ősi felhőből, 4,6 milliárd évvel ezelőtt. Naprendszerünk a környezetében található csillagokhoz képest 19,4 km/s sebességgel halad a Herkules csillagkép irányába, és a szomszédos csillagokkal együtt 220 km/s-os sebességgel kering a Tejútrendszer középpontja körül, 250 millió évenként megtéve egy fordulatot.

A csillagok élete

A csillagok olyan égitestek, melyek belsejében saját tömegükből kifolyólag akkora nyomás és hőmérséklet uralkodik, hogy ott a körülmények kedveznek a termonukleáris reakciók lezajlásának. A Világegyetemben a látható anyag nagyrésze csillagok formájában van jelen. A fúziós reakciók során a csillagok belsejében egyre nehezebb atommagok épülnek fel energia felszabadulása mellett - ez táplálja az objektum sugárzását. A „Csillagok keletkezése” című fejezetben végigkövethető, milyen folyamatok révén jönnek létre a csillagok. A kialakulásuknál összehúzódó és forrósodó felhő idővel olyan energiatermeléssel fog rendelkezni, amelynek révén egyensúlyi állapotba jut. Életének nagyrészt, közel 90%-át ilyen egyensúlyi állapotban tölti minden csillag, ezalatt hidrogén atommagokból hélium atommagokat épít fel, ezt nevezik fősorozati állapotnak. Ennek a szakasznak a hossza a csillag tömegétől függ: minél nagyobb a tömege, annál magasabb hőmérséklet uralkodik centrumában és annál gyorsabban fogyasztja üzemanyagát. A 10 naptömegű csillagok élettartama például néhányszor 10-100 millió év, Napunké kb. 10 milliárd év, a 0,5 naptömegű csillagok akár 20-30 milliárd évig is élhetnek.

Energiatermelés a csillagokban

A csillag belsejére külső rétegei hatalmas nyomással nehezednek. A nagy nyomás és hőmérséklet következtében az anyag szabad elektronok és atommagok keverékére bomlik, ionizált állapotba kerül, ezt nevezzük plazmának. Az atommagok a heves hőmozgás következtében nagysebességgel ütköznek egymásnak, és időnként összetapadnak: fúziós reakciókat hoznak létre. Ehhez rendkívül heves hőmozgás, azaz rendkívül magas hőmérséklet kell, ezért csak a csillag központi tartományában, a magban zajlanak. A csillagokban is, mint a Világegyetemben mindenhol a hidrogén a leggyakoribb elem, így életük legnagyobb részében hidrogén atommagokból hélium atommagokat építenek fel. A folyamat során négy proton (azaz négy hidrogén atommag) hoz létre két protonból és két neutronból álló hélium atommagot. A reakció lényege, hogy a négy alkotórész tömege külön-külön nagyobb, mint a keletkezett atommag teljes tömege. A kettő közötti különbség a tömegdefektus, a kötési energia - ez az ami a fúzió során felszabadul. (Amennyiben visszafelé akarjuk játszani a reakciót, és alkotóira szeretnénk szétválasztani a hélium atommagot, energiát kell befektetnünk - amennyit az egyesítés során kaptunk - ez pedig megnöveli az egyes részecskék reakció utáni tömegét.)

4 db H atommag tömege külön-külön: $6,694 \times 10^{-24}$ g 1 db He atommag tömege $6,645 \times 10^{-24}$ g
Különbség: $4,82 \times 10^{-26}$ g Tömegdefektus: 0,7%

Az eredeti tömeg 0,7%-a szabadul fel energia formájában, ez a csillag sugárzásának forrása. Többféle energiatermelő folyamat játszódik le a fősorozati csillagok belsejében, ezek közül a két legfontosabbat ismertetjük az alábbiakban.

Proton-proton reakció: Ebben a folyamatban első lépésként két proton kapcsolódik össze, amihez 10^{-13} cm-re kell meg közelíteniük egymást - a nukleonokat összetartó magerő ugyanis ilyen távolságban képes legyőzni a két azonos töltésű proton között fennálló elektromágneses taszítást. A protonok ütközése a taszítás miatt általában rugalmas, csak nagyon ritkán kerülnek annyira közel egymáshoz, hogy összetapadjanak. (Mivel a csillag belsejében hatalmas mennyiségű anyag található, egyetlen másodperc alatt is rendkívül sok összekapcsolódás jön létre.) Ilyenkor egy deutériummag keletkezik, az egyik proton ugyanis egy pozitron és egy neutrínó kibocsátása közben neutronná alakul. Az eltávozó pozitron egyesül egy elektronnal és

elektromágneses sugárzás keletkezik. A következő lépésben a deutériummag egy harmadik protonnal találkozik, amelyet magába épít, és He^3 izotópot hoz létre elektromágneses sugárzás kibocsátása közben. Ezután általában egy magához hasonló He^3 izotóppal lép kölcsönhatásba, és egy négyes tömegszámú héliummag jön létre, két proton felszabadulásával. Egy héliummag keletkezése során $4,1 \times 10^{-5}$ erg (26,2 MeV) energiával lesz gazdagabb a csillag. (Az energia egy részét a neutrínók elviszik.)

Szén-nitrogén ciklus: Ennek során ugyancsak hélium atommagok keletkeznek de szén és nitrogén katalizátor közreműködésével. Egy C^{12} mag és egy proton ütközésekor elektromágneses sugárzás keletkezik, és egy N^{13} atommag jön létre. Ez azonban nem stabil, és egy pozitron valamint egy neutrínó kibocsátásával C^{13} izotóppá alakul. A pozitron elektronnal találkozáva sugárzás formájában megsemmisül. A C^{13} mag egy protonnal való ütközés után N^{14} maggá alakul elektromágneses sugárzás kibocsátása közben. A nitrogénmag egy további protonnal ütközve instabil O^{15} maggá alakul, ismét elektromágneses sugárzás kibocsátásával. Ezután az O^{15} mag N^{15} magra, és egy pozitronra valamint egy neutrínóra esik szét. Majd az N^{15} mag protonnal találkozik és C^{12} mag, valamint He^4 keletkezik belőle. A neutrínók energiájának figyelembevétele nélkül 4×10^{-5} erg (25 MeV) energia szabadul fel egy hélium atommag kialakulása során.

A fősorozati csillagokban mindkét reakció folyik. Az, hogy a kettő közül melyik zajlik le nagyobb számban, a csillagban uralkodó hőmérséklettől függ - ez pedig a csillag tömegétől. A kisebb tömegű csillagokban a proton-proton reakció révén, a nagyobb tömegűekben a szén-nitrogén ciklus által szabadul fel több energia. Központi csillagunk belsejében 14-15 millió fok uralkodik, így itt a proton-proton reakció dominál, azonban a Napnál nem sokkal nagyobb tömegű égitesteknél már a szén-nitrogén ciklus veszi át a főszerepet.

A csillag a fősorozaton stabil állapotban, mechanikai és termikus egyensúlyban van. A csillag belsejében uralkodó nyomás a gáznyomásból és a sugárnyomásból (a sugárzás formájában felszabaduló energiából) tevődik össze. Az esetleges túl nagy energiaszabadulás kinyomja a külső rétegeket, megnöveli a mag térfogatát. Ennek következtében csökken a fúziós reakciók száma és így a belső nyomás is, ekkor erősebb húzódik a csillag. A folyamat egyensúlyban tartja az égitestet, ezért a csillagok önszabályozó termonukleáris reaktoroknak is tekinthetők. A csillag anyaga termikus egyensúlyban is van. A belsejében felszabaduló energiának egyenlőnek kell lennie a világűrbe kisugárzott energiával, és nem lehetnek benne olyan tartományok, amelyek állandóan melegednének vagy hűlnének.

Energiatranszport

A csillag belsejében keletkező energia háromféle módon juthat a felszínre: sugárzás, konvekció vagy hővezetés útján. A magfolyamatok során felszabaduló energia rendkívül rövid hullámhosszú elektromágneses sugárzás formájában jelenik meg. A sugárzással szállított energia mennyisége a csillag anyagának átlátszatlanságától (opacitásától) függ. Ha a csillag relatíve átlátszó a sugárzás szempontjából (azaz opacitása kicsi), a fotonok centiméteres nagyságrendű utat tehetnek meg, azaz hatékonyan tudnak energiát szállítani - így a sugárzási áram nagy. Ha az anyag az elektromágneses sugárzásra nézve eléggé átlátszatlan (azaz opacitása nagy), a fotonok nagyon gyakran elnyelődnek, a sugárzási áram kicsi. A Nap központi részében az anyag ionizált állapotban van, a fotonok nem nyelődnek el vagy sugárzódnak ki elektronok energiaátmenetei során - a felszabaduló energia sugárzás formájában terjed. Központi csillagunk külső tartományaiban a hőmérséklet már elég alacsony ahhoz, hogy az atommagok elektronokkal rendelkezzenek, és itt abszorpciós folyamatok játszódnak le - a sugárzás gyakran elnyelődik. Az opacitás értéke olyan nagy lesz, hogy a keletkező sugárzási

áram egymaga már nem tudja tovább a felszínre szállítani a bent felszabaduló energiát. A sugárzás elnyelődik, melegíteni kezdi az anyagot, a melegebb csomók pedig emelkedni kezdenek. A forró buborékok felemelkednek, majd amikor lehűlnek visszasüllyednek - ezt nevezik konvekciónak. (A folyamat jellegét tekintve hasonló a tűzhelyen forró folyadékokban megfigyelhető jelenséghez.) A konvekciós zóna nagysága és elhelyezkedése a csillag jellemzőitől függ, a benne található anyag a heves mozgás következtében teljes mértékben összekeveredik. Azokban a régiókban, ahol a sugárzásos energia transzport dominál, az anyag összetételében kialakuló különbség megőrződik - azaz a fúziós folyamatok reakciótermékei felhalmozódnak. Az energiaszállítás harmadik módjának, a hővezetésnek csak néhány csillagcsoportnál van gyakorlati jelentősége, például a fehér törpéknél.

Csillagok a fősorozaton

A fősorozati csillagokat jellemzőik alapján csoportokba sorolhatjuk, ezek a jellemzők pedig elsősorban tömegüktől függenek. Minél nagyobb a tömeg, annál magasabb hőmérséklet uralkodik a centrumban és a csillag felszínén. Minél forróbb a felszín, annál rövidebb hullámhossz-tartományban fog az intenzívebben sugározni. A csillagokat energiakibocsátási maximum alapján különböző színekposztályokba soroljuk, ezek közül legismertebbek az O B A F G K M színekposztályok. A skála O felé eső vége a nagytömegű, magas felületi hőmérsékletű csillagokat tartalmazza. Az O csillagok átmérője közel 10-szerese a Napénak, felszíni hőmérsékletük néhány 10 ezer K. Sugárzásuk nagyrésze így az ultraibolya hullámhosszakra esik, amelyhez az optikai tartományból a kék van közel - ezek a csillagok kékes színűek. A színekposztályok között jobbra haladva fokozatosan csökken a tömeg, a méret és a hőmérséklet, a szín pedig egyre vörösebbé válik. (A Nap G2-es csillag, felszíni hőmérséklete 6000 K.) Az M színekposztályú csillagok felszíni hőmérséklete már „csak” 3000 K körüli, átmérőjük 0,7-0,9-e a Napénak. Az O B csillagokat tradicionális okokból korai, a K M csillagokat késői színekposztályúaknak nevezzük. A csillagok tengelyforgási sebességében is tendenciát lehet megfigyelni a színekposztályoknak megfelelően: a nagytömegű csillagok forgása gyors, a kisebb tömegűeké lassabb. (Elképzeltető, hogy a kisebb tömegűeknél a bolygórendszer keletkezése „viszi el” az impulzusmomentum egy részét.)

A csillagok alsó tömeghatára 0,08 naptömeg körüli. Ennél kisebb tömegű objektumok belsejében már nem alakul ki olyan nyomás és hőmérséklet, hogy a fősorozati csillagokra jellemző fúziós reakciókkal energiát termeljenek. Az ilyen égitesteket barna törpéknek nevezik, számuk valószínűleg rendkívül nagy. (Már több alkalommal készültek olyan megfigyelések, melyek barna törpék létre utaltak, ezek azonban további megerősítésre szorulnak.) Kialakulásuk, összehúzódásuk után néhány egyszerűbb fúziós reakció még lejátszódhat belsejükben, de életük nagyrésztében nem rendelkeznek fúziós energiatermelő folyamatokkal - hatalmas gázbolygókra hasonlíthatnak.

A csillagok fejlődése a fősorozat után

A csillag élete nagyrésztében a fősorozaton tartózkodik, energiaszükségletét hidrogén atommagok hélium atommagokká alakításából fedezi. A fősorozat utáni szakasz életének már csak rövid része, ekkor több instabil állapotot megy keresztül és gyakran pulzálni kezd. (Ilyenkor fejlődésének jellege erősen függ tömegétől, ezért az alábbiakban csak néhány jellegzetes tömeggel rendelkező csillag életútját követjük végig.) A fúziós reakciók során folyamatosan fogy a hidrogén és egyre több hélium kezd felhalmozódni a magban. (A középpont elem-

eloszlását egyes csillagoknál a konvekció részben meg tudja változtatni, de ez sem képes ellensúlyozni az idővel egyre nagyobb mértékű hidrogénvesztést.)

A magban így hélium atommagok kezdenek felhalmozódni. Csökken a fúziós reakciók hidrogén alapanyaga, így csökken az energiatermelés, és a mag már nem tudja megtartani a felette elhelyezkedő rétegeket - lassan összehúzódik. A mag összehúzódása során felforrósodik, extra energiát termel, a hidrogén atommagok nukleáris égése pedig a magot övező héjban folytatódik. A két folyamat következtében a mag zsugorodásával párhuzamosan a külső rétegek kitágulnak, felfúvódnak. Ekkor kerül vörös óriás állapotba a csillag. A felfúvódás következtében a felszín ugyanis nagymértékben eltávolodik a magtól, így hőmérséklete csökken és színe vörös lesz. A csillag sugara ekkor nagyságrendileg 100-szor akkora vagy még nagyobbra nő, mint amekkora a fősorozaton volt. A héliummag elfajult izotermikus állapotú lesz, a felette égő hidrogén rétegből egyre több hélium rakódik le rá. Amikor a növekvő tömegű és forrósodó héliummag hőmérséklete eléri a 100 millió K-t, megindul a hélium atommagok fúziós reakciója. A reakció a mag nagyrésztében közel egyszerre indul be, és váratlanul megnöveli a csillag fényességét. Ezt a felfénylést nevezik hélium-flash-nek, tartama néhány 100 év. (A 0,5 naptömegnél kisebb tömegű csillagokban soha sem lesz elég magas a hőmérséklet a hélium fúzió beindulásához.) A fuzionáló héliummag kiterjed, ezzel párhuzamosan a csillag külső rétegei összehúzódhatnak, és az objektum elhagyja az óriáságot. A hélium fúziós reakciói során szén és oxigén kezd felhalmozódni a magban, és előbb-utóbb a hélium nagyrésze is elfogy. Ekkor egy újabb, a korábbihoz hasonló összehúzódási szakasza kezdődik a magnak. Ilyenkor a hélium nukleáris égése a magot övező héjban folyik, melyből kifelé haladva a hidrogénégető héjat találjuk. A csillag külső rétegei a mag összehúzódásával párhuzamosan ismét kitágulnak, és az égítést megint vörös óriás lesz.

A vörös óriás állapotban gyakran instabillá válik a csillag, és pulzálni kezd. Mivel külső felfúvódott rétegei távol vannak a magtól, ott elég alacsony a szökési sebesség. Jelentőssé válik az anyagvesztés, mely az évenkénti 10^{-9} - 10^{-5} naptömeget is elérheti. A másodszori felfúvódás során a csillagok külső rétegeiket mintegy 100 ezer év alatt teljesen elvesztik. A ledobott külső héjak anyaga távolodik a csillagtól, melynek „megkopasztott” forró felszíne sugárzásra gerjeszti azt - ezek a planetáris ködök.

Planetáris ködök

A planetáris ködök megnevezésüket kör alakú, bolygókoronghoz hasonló megjelenésükről kapták. Átlagos tömegük 0,1-0,2 naptömeg, anyaguk átlagos sűrűsége 10 - 20 g/cm^3 , tágulási sebességük néhányszor 10 km/s , élettartamuk néhányszor 10 ezer év.

Amikor a csillag másodszor is felfúvódik, jelentős lesz a tömegvesztése, amelynek mértéke a csillag jellemzőitől függ. A csillagszél nagysága eleinte 10^{-6} naptömeg körüli évente. A továbbiakban mennyisége növekszik, a szél gyorsul, 10 - 20 km/s -os sebességgel évi 10^{-4} naptömeg áramlik már ki, ezt nevezik szuperszélnek. Ahogyan anyagot veszít a csillag, egyre mélyebb és forróbb rétegei kerülnek a felszínre. Amikor a felszín hőmérséklete 20 ezer K körülire nő, ionizálja, sugárzásra gerjeszti a korábban kidobott gázt, és az körülötte láthatóvá válik. A későbbiekben a csillag felületének hőmérséklete 100 ezer K fölé emelkedhet, ekkor már csökken az anyagvesztés, az elszökő gáz sebessége azonban 1 - 4 ezer km/s is lehet (ez a gyors szél). A csillag körüli gázanyagot a forró égítést sugárzásra gerjeszti, világításra készíti. (Ennek az anyagnak az eloszlása nem egyenletes: az egymást utoléró különböző sebességű csillagszelek sűrűbb zónákat alakíthatnak ki.)

Planetáris ködöket kb. 0,5-7 naptömeg közötti kezdeti tömegű csillagok hoznak létre. A köd alakja gyakran aszimmetrikus, amit több folyamat is létrehozhat: az egyenlítői és a poláris vidékek egymáshoz viszonyított egyenlőtlen anyagkidobása, kísérőcsillag hatása, mozgás a csillagközi térben és kölcsönhatás annak anyagával.

Fehér törpék

Ha a csillag tömege kb. 5 naptömeg alatti, ez nem elegendő ahhoz, hogy a héliumégés után visszamaradt szén- és oxigénmagban további reakciók induljanak be. Külső rétegét planetáris köd formájában ledobja, hidrogén- és héliumégető héja lassan kimerül, és a csillag energia-termelő reakciók híján elkezd összehúzódni - ilyenkor keletkezik fehér törpe.

A csillag zsugorodását a fehér törpéknél az elfajult elektrongáz nyomása állítja meg. Az elfajult anyagra nem érvényesek az ideális gáztörvények, nyomása tulajdonképpen csak sűrűségétől függ. A fehér törpe összepréselt anyagában az atommagok nagyon közel kerülnek egymáshoz, így kevesebb pálya alakulhat ki a magok körül, mint ahány elektron van (a klasszikus megközelítés szerint). Amikor az elektronok egy része betölti ezeket az energia-állapotokat, a Pauli-féle kizárási elv értelmében „minden férőhely elkelt”. A maradék elektron kénytelen a már telített pályákon, az azokra jellemzőnél nagyobb energiával mozogni. Ekkor az ionizált anyag rendkívül nagy külső nyomásnak is ellenáll. Ezt nevezik az anyag elfajulásának, amely termonukleáris energiatermelő reakciók nélkül is ellenáll a külső rétegek nyomásának.

A fehér törpék mérete a Föld mérettartományába esik, átmérőjük 10 ezer km körüli, sűrűségük nagy: 10^6 - 10^7 g/cm³. Az elfajult elektrongáz csak adott nagyságú nyomásnak tud ellenállni, így a fehér törpék tömege nem haladhatja meg az 1,4 naptömeget, ez a Chandrasekhar-határ. (Elméletileg számított érték nem forgó csillagokra.) Az összehúzódás több rendkívüli következménnyel is jár: pörgésük felgyorsul, tengelyforgási idejük néhányszor 10 másodpercre nő. Az eredeti mágneses tér megmarad, ami kis térfogatba zárva rendkívül erős lesz. A fehér törpék anyaga jó hővezető, belsejükben mindenhol közel azonos hőmérséklet uralkodik. (Felszínükön egy vékony rétegben nincs elfajulva az anyag, itt időnként fúziós reakciók történhetnek, amint a csillagközi térből hidrogén hullik rájuk.) A megfigyelt fehér törpék hőmérséklete 100000-4000 K közötti. Lassan, évmilliárdok alatt hűlnek ki teljesen, ekkor fekete törpe lesz belőlük.

Az 5-8 naptömegnél nagyobb tömegű csillagok magjában a nagy tömeg miatt akkora hőmérséklet alakul ki, hogy tovább fuzionál a szén valamint az oxigén, és a reakciók során egyre nehezebb atommagok épülnek fel. A fúziós reakciók egészen a vasmagokig zajlanak le, ennél nehezebb atommagok létrehozásakor azonban már nem szabadul fel energia, így az energiaforrások kiapadnak. A belső nyomás már nem tudja megtartani a ránehezedő külső rétegeket, és a csillag összeroskad. Az ekkor megfigyelhető jelenséget nevezzük szupernóva-robbanásnak.

Szupernóvák

A szupernóva jelenség pontos lezajlását még ma sem ismerjük. Az alábbiakban egy olyan elgondolást vázolunk, mely lehetséges magyarázatot ad a neutroncsillagok keletkezésére és a nagyenergiájú robbanásokra. Egy szupernóvarobbanás során felszabaduló energia hatalmas, nagyságrendileg megegyezik a Nap által 10 milliárd év alatt kisugárzott összes energiával. A csillag energiaforrásainak kimerülése után a vasmag összehúzódási sebessége közel áll a

szabadesés sebességéhez. A zsugorodás során a hőmérséklet eleinte nem növekszik nagymértékben, mivel a mag hatásos „hűtőkkel” rendelkezik. Az egyik ilyen hűtő a vasmagok alfa részekre és neutronokra történő lebomlása. Amikor a csillag összehúzódó magjának hőmérséklete egy kritikus határt elér, ez a bomlás egy ideig megállítja a további hőmérséklet-emelkedést. A burok eközben a magot követve a centrum felé zuhan és felmelegszik. Amint véget ér a „vas hűtő” működése, a centrum hőmérséklete gyorsan eléri a 20 milliárd fokot, sűrűsége 10^{10} g/cm³-re emelkedik. Megkezdődik az alfa részek felhasadása szabad elektronokra és protonokra, melyek neutronokat alkotnak. Ezzel a reakcióval megemelkedik a neutrínóképződés, a neutrínók pedig nagy áthatolóképességük révén akadálytalanul eltávoznak a csillagból - ugyancsak hatásos hűtőként üzemelve. Amikor a hőmérséklet eléri a 40 milliárd K-t, a sűrűség pedig 3×10^{11} g/cm³ közelébe jut, az anyag tovább már nem lesz átlátszó a neutrínókra nézve. Ezzel együtt kikapcsolódik a „neutrínó hűtő”, és a hőmérséklet gyorsan felszökik.

A felszabaduló energia hatalmas mértékben megnöveli a nyomást a centrumban, és egy kifelé haladó lökeshullámot indít el, melynek hőmérséklete 10 milliárd K körül lehet. (A mag összehúzódása valószínűleg akkor ér véget, amikor hőmérséklete túllépi a 100 milliárd K-t.) A centrumba hulló felforrósodott burok ezzel a lökeshullámmal találkozik és az ütközés tovább növeli a hőmérsékletet, nagyjából 200 milliárd K-re - ekkor a tetőfokára hág a robbanás. A külső rétegekben ugyanis a magtól távolodva egyre alacsonyabb hőmérséklet uralkodott a csillag korábbi életében, így az egyes rétegekben csak meghatározott szintig játszódtak le a fúziós reakciók. Ezúttal a behulló burok rendkívül gyorsan felmelegszik, a benne található anyagok szinte egyszerre fuzionálnak, a felszabaduló energia mértéke pedig óriási. (A hatalmas energiafelszabadulás során a vasnál nehezebb elemek is létrejönnek.) A robbanás leszakítja a csillag burkát, és azt 10-20 ezer km/s-os sebességgel kirepíti. Az anyagkidobás mértéke csillagonként változik, az égitest tömegének nagyrésztét a robbanás során ledobja. Az objektum sugárzása drasztikus mértékben megnövekszik, ilyenkor gyakran túl is ragyogja anyagalaxisát. (Az imént vázolt események mindössze egy másodperc körüli idő alatt játszódnak le.) A robbanás során ledobott héj egy ideig még megfigyelhető, amíg életben tartja a neutroncsillag sugárzása, illetve míg lassan szét nem oszlik a csillagközi térben - ez néhányszor tízezer év. A szupernóvarobbanások gyakran aszimmetrikusak. Ennek következtében az égitest szívében kialakuló neutroncsillag nagysebességgel kilökődik eredeti helyéről.

Neutroncsillagok

A neutroncsillagok kisméretű, nagytömegű égitestek, anyaguk nagyrésztét neutronok alkotják. Szupernóvarobbanások során keletkeznek a csillagok magjából. Átmérőjük 10 km körüli, sűrűségük az atommag sűrűségéhez áll közel: 10^{17} - 10^{19} g/cm³. A nagytömegű csillag össze-roskadása során a hatalmas nyomás hatására az anyag nagyrésze neutronokká alakul. Ezek után az objektum már nem termel energiát, a további összehúzódást az egymásnak préselődő neutronok állítják meg. (A szabad neutronok egyébként nem stabil képződmények, laboratóriumi körülmények között gyorsan elbomlanak. Itt azonban erre képtelenek, a hatalmas sűrűség miatt ugyanis az összes energiaszint telítve van.) A neutroncsillagok tömege 0,5 és 3-4 naptömeg közötti lehet, általában 5-30 naptömegű csillagok élete végén alakulnak ki. Az 1,4 naptömegnél kisebb tömegű mag elméletileg fehér törpe formájában is stabil állapotba juthat. Erre azonban ez esetben nincs lehetőség, mivel a szupernóvarobbanáskor bezuhanó külső rétegek akkora nyomást fejtenek ki a magra, hogy annak az elfajult elektrongáz nem tud ellenállni. (A tömeg felső határa elég bizonytalan, ezt ugyanis erősen befolyásolja a csillag mágneses tere és az összehúzódás során felgyorsuló pörgés.)

Persze a neutroncsillagok sem csak neutronok homogén keverékéből állnak, hanem más részecskéket is tartalmaznak. Belső szerkezetükről csak közelítőleges modelljeink vannak. Felszínükön valószínűleg néhány méter vastag „gázréteg” található, itt az atommagok még megtartják elektronjaikat, az elektronhéjak azonban az erős mágneses tér következtében eltorzulnak, összenyomódnak. (A csillag összehúzódása során kis térfogatba préselve felerősödik az eredeti mágneses tér.) A felszíni kb. 1 km vastag rétegben nehéz, főleg vas atommagokat találunk kristályrácsba rendeződve, melyeket elektronok „tengere” jár át. A külső kéreg után mintegy 2 km vastag réteg következik, itt a kristályos szerkezetbe kapcsolódó atommagok között az elektronok mellett már szabad neutronok is megjelennek. Ez alatt következik a neutroncsillag legnagyobb kb. 10 km-es övezete, amelyet főleg neutronok alkotnak, kevés proton és elektron „szennyezéssel”. Itt a neutronok bizonyos szempontból folyadékként viselkednek: az anyag szupravezető, azaz ellenállás nélkül vezeti az elektromos áramot, és szuperfolyékony, nincs viszkozitása. A centrumban feltehetőleg a neutronoknál még nehezebb magok találhatók, melyek hétköznapi körülmények között rendkívül gyorsan elbomlanak.

A neutroncsillagok gyorsan hűlnek, kialakulásuk után néhány hónappal felszíni hőmérsékletük tízmillió K alá, majd néhány ezer, tízezer év alatt egymillió K alá süllyed. Az impulzusmegmaradás törvénye értelmében az összeroskadó csillag forgási sebessége hatalmas lesz, másodpercenként többször is megfordul tengelye körül. (Ha Napunkat hirtelen neutroncsillaggá nyomnánk össze, tengelyforgási ideje 0,0001 másodperc lenne.) A neutroncsillagok kiterjedt és rendkívül nagy energiatartalmú magnetoszférával rendelkeznek, ennek belső tartományai együtt forognak az égitesttel, a külső részek pedig spirálisan feltekerednek.

A periodikus rádiósugárzást kibocsátó pulzárok neutroncsillagok. Itt valószínűleg az égitest felszínének egy, illetve több pontjáról vagy a neutroncsillagot környező magnetoszférából nagyenergiájú rádiósugárzás relatíve keskeny nyílásszög alatt távozik el (akárcsak egy jó fényszórónál). Ennek észlelésére pedig csak akkor van lehetőség, ha a kérdéses sugárzási „kúp” éppen ránk mutat. A gyors tengelyforgás következtében erre rendkívül gyakran kerülhet sor, ezért látjuk pulzálni az égitestet. (A pulzárok periódusának segítségével lehet a neutroncsillagok tengelyforgási időtartamát meghatározni.) A neutroncsillagok kismértékben folyamatosan lassulnak, mivel pörgésük kinetikus energiája elektromágneses energiává alakul és eltávozik. A forgás lassú, folyamatos csökkenésén kívül szabálytalan, ugrásszerű változások is előfordulnak. Ezeket olyan „csillagrendések” (glitch-ek) válthatják ki, melyek során átrendeződés történik a csillag belső szerkezetében. A rendkívül gyors pörgés következtében a neutroncsillag alakja ugyanis enyhén lapult, ez a lapultság pedig a pörgés lassulásával csökkenni fog, aminek a szilárd kéreg ellenáll. Törések, hasadások keletkeznek benne, tömegátrendeződések történnek, ezek válthatják ki a csillagrendéseket.

Fekete lyukak

A fekete lyukak olyan csillagok magjából alakulnak ki, melyek tömege akkora, hogy saját gravitációs terük összehúzó erejének semmilyen ismert fizikai folyamat nem tud ellenállni, így az égitest „teljesen” összezsugorodik. Ekkor egy olyan tartomány alakul ki, amelyen belülről az összehúzódott csillag gravitációs tere hatására sem anyag sem sugárzás - így fény sem - szabadulhat ki. Ennek a térségnek a határát nevezzük eseményhorizontnak, amely egyirányú átjáró: csak befele lehet áthaladni rajta. A csillagok összeroskadásával keletkező fekete lyukak alsó tömeghatára 2,5-3 naptömeg körüli, átmérőjük néhány km. (Valószínűleg léteznek többmillió naptömegű óriási fekete lyukak is, melyek galaxisok centrumában helyezkednek el, és elképzelhető mikroszkopikus méretű fekete lyukak létezése is.) Általában 25-30 naptömegű, illetve ennél nagyobb tömegű csillagok magjából jön létre életük végén fekete lyuk. (Ez több

tényezőtől is függ, pl. a csillag élete során elszenvedett anyagvesztéségtől.) Jelenleg nem tudjuk pontosan, hogy a fekete lyukak kialakulásakor is bekövetkezik-e szupernóvarobbanás, avagy sem. A fekete lyukakat környezetükkel való kölcsönhatásuk révén lehet megfigyelni, ma már sok olyan égitestet ismerünk, amelyek nagy valószínűséggel fekete lyukak. (A valószínűségben a fekete lyukak „párolognak”, részecskéket bocsátanak ki - ennek a kvantumfizikai folyamatnak a taglalása azonban messze túlnyúlik feladatkörünkön.)

Csillagunk a Nap

A Nap a legközelebbi csillag. Színképtípusa G2-es, átmérője 1,4 millió km körüli, tömege 333 ezerszerese Földünkének, átlagos sűrűsége $1,4 \text{ g/cm}^3$. Eredeti anyagának kb. 74%-a hidrogén, 24%-a hélium, a nehezebb elemek aránya 2% körüli. A Nap külső rétegeiben jelenleg is ez az arány figyelhető meg, magjában azonban (mivel az anyag a Nap mélyén nem keveredik), a hélium mennyisége fokozatosan növekszik a hidrogén rovására. (Magjában jelenleg kb. 36% hidrogén, 62% hélium és 2% nehezebb elem található.)

A Nap felépítése

A Nap belsejében saját tömegéből adódóan nagy nyomás és magas hőmérséklet uralkodik, így az anyag ionizált állapotban van. Centrumában a hőmérséklet 14-15 millió K, a nyomás 3×10^{11} atmoszféra körüli, a sűrűség 155 g/cm^3 . A fúziós energiatermelő folyamatokhoz magas hőmérséklet és sűrűség szükséges, így azok csak a magban játszódhatnak le. Ez a Nap sugarának negyedéig terjed ki, de itt található az égitest tömegének mintegy fele. A Nap belsejében másodpercenként 600 millió tonna hidrogén atommag alakul át hélium atommaggá, ebből 4 millió tonna alakul energiává, melynek révén másodpercenként $3,8 \times 10^{26} \text{ J}$ energiát termel. A Nap belső részében sugárzással terjed az energia, de a nagy anyagsűrűség miatt a fotonok még így is átlagosan egy másodpercenként ütköznek és véletlen irányba szóródnak. Egy fotonnak így 1 millió év nagyságrendű idő szükséges ahhoz, hogy a felszínre jusson - a Napnak ez az átlátszatlansága adja stabilitását. Amint kifelé haladunk a Nap belsejéből, a konvekció 150-200 ezer km mélyen indul meg, és az energia innen kezdve hatalmas buborékok formájában áramlik fölfelé. Ez a konvekciós réteg valószínűleg több egymásra épülő, fölfelé menet egyre kisebb méretű konvekciós cella szintből áll. (Jelenlegi ismereteink szerint legalul található az óriáscellák, melyek átmérője 100 ezer km feletti, majd a 30 ezer km körüli szupergranulák következnek, ezután az 5-10 ezer km-es mezogranulák, végül pedig a granulák 1000 km körüli átlagos mérettel.) A konvekciós zóna aljáról az anyag kb. 1 hónap alatt ér a Nap felszínére.

A Nap felszínén a 400-500 km vastag fotoszférát értjük, innen származik a Nap látható fénye. Itt 6000 K körüli a hőmérséklet, kb. 0,17 atmoszféra a nyomás és 10^{-6} g/cm^3 a sűrűség. (A fotoszféra alatti rétegeket a Nap belsejének, a felette elhelyezkedőket pedig a Nap légkörének nevezzük - ez utóbbit alkotja a kromoszféra és a korona.) Ezek szerint központi csillagunk nem rendelkezik szilárd felszínnel, a távcsőben látható napkorong pereme mégis éles. A jelenség oka, hogy a Földről nézve a 400-500 km vastag fotoszféra távcsöveink felbontóképessége alatt marad. A szilárd felszín hiányáról egyébként könnyen meggyőződhetünk fotografikus úton. Már a kisebb távcsövekkel készített felvételeken is fel lehet figyelni a szélsőtétedésre: a napkorong fénye kismértékben csökken, amint a közepétől pereme felé haladunk. Ennek oka, hogy a Nap anyagában - annak átlátszatlansága miatt - csak meghatározott távolságon láthatunk keresztül. Mivel a korong közepén lévő tartományokra közel merőlegesen tekintünk, ott mélyebben fekvő, forróbb és erősebben sugárzó rétegeket pillanthatunk meg, mint amikor a korong pereménél „ferdén” nézünk a Napba.

A Nap nem merevtestként forog, hanem differenciálisan rotál, azaz forgási ideje szélességenként változik. A sarkok közelében a tengelyforgási idő 37 nap körüli, míg az egyenlítőnél kb. 26 nap - ennek megfelelően mozognak a felszíni képződmények is. A differenciális rotáció pontos oka egyelőre nem ismert.

A Nap légkörének jelenségei

A korábban már említett granulák a fotoszféra átlagosan 1000 km átmérőjű képződményei, élettartamuk 6-10 perc körüli. Egy-egy granula belsejében 1-2 km/s-os sebességgel áramlik felfelé az anyag, ez a tartomány világosabbnak látszik, mivel forróbb a környezeténél. Energiája egy részét a felszínre jutva kisugározza, majd a granula külső, sötétebb részén az immár hidegebb anyag visszaáramlik. A granulák teljesen beborítják a fotoszférát, szemcsés, márványos megjelenést adva annak. A szpikulák hosszúka, kúp alakú képződmények, szélességük 700-1000 km alapjuknál, magasságuk 5-15 ezer km, így a koronába is felnyúlhatnak. Hatalmas számban találhatók a napkorongon, átlagos élettartamuk 4-10 perc körüli. Megfigyeléseink szerint a szupergranulák határainál, az összesűrűsödő erővonalaknál helyezkednek el.

A fotoszféra legfeltűnőbb objektumai a napfoltok. Ezek a környezetüknél sötétebbnek látszanak, mivel 1000-2000 fokkal hidegebbek annál. Egy egyedülálló napfolt átlagos átmérője 1000 km, területén a fotoszféra 100 km-es mélységig besüllyed, élettartama nagyságrendileg 1 hét. Két rész különböztethető meg a belsejében: középpontjában látható a sötétebb umbra, mely a folt teljes területének mintegy 20%-át fedi le, ezt övezi a sugárirányban szálak szerkezetű, világosabb penumbra. A napfoltok általában csoportosan figyelhetők meg, a csoportok mérete százezer km-es nagyságrendű, élettartamuk változó, általában 1 hónap körüli.

A Nap erős mágneses térrel rendelkezik, amit valószínűleg a töltéssel rendelkező anyag-tömegek mozgása idéz elő a konvektív zónában, illetve a sugárzási zóna felső részében. A differenciális rotáció következtében az egyenlítő lehangyja a pólusokat, és az erővonalak megnyúlnak, feltekerednek, hatalmas energia halmozódik fel bennük. Az erős csavarodás hatására az erővonal hurkok ki is emelkedhetnek a Nap felszínéből. Valószínűleg ilyenkor jön létre a fotoszféra némely jelensége, többek között a napfoltok is. A napfoltok száma és a Nap aktivitása nem állandó és egyenletes, hanem a mágneses ciklusoknak megfelelően periodikus változásokat mutat. Két napfoltminimum között eltelt időt napfoltciklusnak nevezzük, ennek átlagos hossza 11 év, de több éves eltérést is mutathat. A Nap aktivitása egyébként nemcsak időben, hanem helyileg is változik. A fotoszféra jelenségeinek egy része az úgynevezett aktív régiókban csoportosul, itt jelennek meg a napfoltok is. Ezek a ciklus elején 30-40 fokos naprajzi szélességnél tűnnek fel, majd az idő előrehaladtával egyre közelebb húzódnak az egyenlítőhöz. A Nap egyes részeinek sebessége a differenciális rotáción túl is eltér néhány m/s-mal a „normális” értéktől, ezeket nevezzük aktív szélességeknek. Helyzetük szintén az egyenlítőhöz közelít a ciklus során, rajtuk helyezkednek el az aktív régiók. Itt fejlődnek ki a napfoltok is, melyek először egy kis pórus formájában tűnnek fel, majd többnyire egy vezető (elől haladó) és egy követő foltcsoporttá alakulnak. Kialakulásuk után hamar az egyenlítővel párhuzamos irányba állnak be, az egyik csoportnál valószínűleg kilépnek, a másiknál pedig visszatérnek az erővonalak a Nap belsejébe. A Nap északi és déli féltekéjének polaritása ellentétes. Egy adott féltekén az összes vezető folt polaritása azonos, és ellentétes a másik félteke vezető foltjaival, míg a vezető és követő foltok polaritása szintén ellentétes. A polaritások a 11 év körüli napfoltciklusnak megfelelően rendszeresen cserélődnek. A napfoltok száma és a napaktivitás nemcsak 11 éves ciklusokat mutat, hanem ennél hosszabb időtartamú változásai is ismeretesek - előfordult, hogy több évtizeden keresztül szinte egyetlen folt sem mutatkozott a Napon.

A fáklyamezők a fotoszféra, illetve a felette elhelyezkedő kromoszféra képződményei. A fotoszféránál néhány száz fokkal melegebbek, így annál fényesebb képződmények, gyakran a napfoltok körül mutatkoznak, de 35 fokos szélesség felett is megfigyelhetők. A fáklyák élettartama változó, legtöbbször csak órákban mérhető, de elérheti az egy hónapot is.

A protuberanciák a fotoszféra felett lebegő hatalmas gáztömegek, a Nap légkörének talán leglátványosabb képződményei. Anyaguk sűrűbb és hidegebb a kromoszféránál, átlagos méretük 100 ezer km körüli. Két fő típusukat érdemes megemlíteni: a nyugodt és az aktív protuberanciákat. A nyugodt protuberanciák élettartama nagyságrendileg egy hónap, anyagukat a fotoszférából kinyúló erővonalak tartják lebegve, illetve azok mentén áramlanak vissza a Napba. Az aktív vagy robbanó protuberanciák ezzel ellentétben gyors változásokat mutató, rövidéletű képződmények. A bennük lévő anyag néhány száz km/s-os sebességgel lökődik ki, a nagyobb protuberanciák anyagának egy része el is hagyhatja a Napot. A korong szélén lévő protuberanciákat az égi háttér előtt világosnak látjuk, míg ha a protuberancia a korong előtt helyezkedik el, sötétebbnek mutatkozik, mint a fotoszféra - ekkor filamenteknek nevezzük őket.

Flerek (napkitörések): Rövid életű, néhány perces, rendkívül heves, a napfoltokhoz kapcsolódó robbanásos jelenségek. Gyakoriságuk változó, a naptevékenység maximumakor többször tíz kisebb-nagyobb flerjelenség történik naponta. Valószínűleg ellentétes mágneses terek találkozásakor hirtelen felszabaduló energia hozza létre őket. Hőmérsékletük többször tízmillió fok is lehet, azaz meghaladhatja a Nap belsejében uralkodó hőmérsékletet. Anyaguk kilövellési sebessége eléri az 1000 km/s-ot, így egyetlen alkalommal akár több millió tonnányi anyag is elhagyhatja a Napot.

A kromoszféra a fotoszféra felett elhelyezkedő kb. 10 ezer km vastag réteg. Amint a fotoszférából kifelé haladunk, folyamatosan csökken a hőmérséklet, és nemsokára eléri a 4500 K-es minimumot - itt kezdődik a kromoszféra. Ennek anyaga ritka, teljes napfogyatkozások alkalmával vékony rózsaszín réteggént figyelhető meg a Nap felszíne felett. Átlagos hőmérséklete 10 ezer K. Felső határánál egy néhány száz km-es átmeneti réteg található, melyben felfelé haladva rendkívül gyorsan nő a hőmérséklet, mely végül eléri az egymillió fokot, itt a sűrűség 10^{-16} g/cm³.

A korona a kromoszféra után következő réteg, 10-20 ezer km-rel kezdődik a fotoszféra felett, ez a Nap légkörének legkülső, ritka tartománya. A belső korona kb. 2 napsugárnyira terjed ki a Nap felszínétől, itt a maximális hőmérséklet 1,5 millió K. A külső koronában 1 millió K körüli a hőmérséklet, ennek határát gyakorlatilag nem lehet meghúzni, ugyanis folyamatosan megy át a ritka bolygóközi térbe. A kromoszféra és a korona magas hőmérsékletéért a fotoszféra vad jelenségei a felelősek. Többek között a lentről származó akusztikus lökéshullámok, magneto-hidrodinamikusan hullámok fűtik fel azt - a jelenség pontos háttere egyelőre nem ismert. A korona szálak szerkezetet mutat, napfoltmaximumkor közel gömbszerű, napfoltminimumkor a pólusoknál belapul, ekkor látványosabb. A magas hőmérséklet következtében a korona anyaga eléri és meg is haladja a szökési sebességet, ezért rendkívül gyorsan áramlik kifelé. Ezt a részecskeáramot nevezzük napszélnek, melynek révén a Nap másodpercenként 3 millió tonnányi anyagot veszít. Induló sebessége 400 km/s körüli, a Naptól távolodva fokozatosan lassul, a Föld távolságában átlagosan 400 km/s-os, sűrűsége itt általában 10 részecske cm³-enként. A korona anyaga nem egyenletesen szóródik szét. A napszél nagy része ugyanis az úgynevezett koronalyukakból fúj a pólusok környékén, itt a mágneses erővonalak nem alkotnak zárt hurkot. Ezek a régiók sötétebbnek mutatkoznak környezetüknél, bennük a gáz sűrűsége kisebb, mint a környező koronában, és a hőmérséklet is csak feleakkora.

A kiáramlott töltött részecskék mágneses teret is visznek magukkal, amely a Nap tengelyforgása következtében felcsavarodik, és spirális alakot ölt a Naprendszerben. A napszél természetesen impulzuszórártómot is szállít a Napból, aminek következtében központi csillagunk tengelyforgása kismértékben lassul. A Nap északi és déli részéről kiáramló töltött részecskék tömegét a Nap egyenlítői síkja közelében elhelyezkedő semleges áramréteg választja ketté. Ez a sík kisebb-nagyobb szabálytalanságok miatt deformálódik, hullámos lesz. Ennek következtében a bolygók síkjában ellentétes polaritású szektorok váltakoznak, az égitestek hol északi, hol déli polaritású részekbe lépnek be. A Napból a napszél formájában kiáramlott részecskék folyamatosan ütköznek bolygónk magnetoszférájával. Amikor fel-erősödik áramlásuk, a Földön sarki fényt és geomágneses viharokat lehet megfigyelni. Hasonló hatást válthatnak ki a napflarek által kidobott részecsketömegek.

A Nap mindegy 4,5 milliárd évvel ezelőtt került a fősorozatra, akkor sugárzása a jelenleginél közel 30%-kal gyengébb volt. Üzemanyaga még kb. 5 milliárd évre elegendő magjában, majd elfogyta után vörös óriás állapotba kerül. Erős sugárzása elpárologtatja a bolygók vizét és légkörét, a Merkúr, a Vénusz és talán még a Föld is a Nap kiterjedt belsejében fognak keringeni. Végül központi csillagunk külső rétegei elszállnak, és a szénben, oxigénben gazdag mag fehér törpe állapotban marad vissza.

A Nap helye a csillagok között

A csillagok energiasugárzásukat tekintve széles skálán mozognak. Találhatunk olyan csillagokat, amelyek milliószor annyi energiát bocsátanak ki, mint a Nap, de ugyanakkor olyanok is akadnak, amelyek Napunk sugárzásának csak milliomodával pislákolnak. A nagy változatosság részben a csillagfejlődés különböző állapotaival, részben pedig az egyes fősorozati csillagok különböző tömegével függ össze. Természetesen a fényes csillagok a feltűnőbbek, így míg a nagy energiakibocsátásúak távolról is megfigyelhetők, addig a kisebbek még közlelről se nagyon vehetők észre. Éppen ezért az éjszakai égen megfigyelhető csillagok látszó fényességében a csillag sugárzása fontosabb szerepet játszik, mint távolsága. A csillag szó kapcsán általában hatalmas, rendkívül nagy energiakibocsátású égitest jut az eszünkbe. Az ismeretterjesztő könyvekben gyakran elhangzik az a kijelentés, mely szerint „a Nap átlagos csillag”. Ez ebben a formában nem igaz, a valóságban ugyanis a csillagok nagy része sokkal halványabb a Napnál. A környezetünkben található csillagoknak kb. 70%-a vörös törpe - azaz a Napnál sokkal kisebb tömegű és energiakibocsátású égitest. A K színképosztályba tartozó, már nagyobb energiakibocsátású csillagok száma 15% körüli, majd pedig a csillagfejlődés egyik végállapotát képviselő objektumok következnek, a fehér törpéknek, melyek aránya 10%. Ezek szerint a Tejútrendszerben megfigyelhető csillagoknak nagyjából 95%-a halványabb a Napnál. Tehát központi csillagunk a maradék „elit” 5%-ba tartozik, úgy is mondhatjuk, hogy a felső tízezer tagja. Természetesen ez nem azt jelenti, hogy rendkívüli objektum lenne. Hozzá hasonló sokmillió van még galaxisunkban, és olyanok is nagyszámban akadnak, amelyek sugárzása több nagyságrenddel múlja felül a mi Napunkét - ebből a szempontból akár átlagos csillagnak is tekinthetnénk.

Napunk valószínűleg magányos, egyedüli csillag. Jelenlegi ismereteink szerint a csillagoknak nagyjából a fele kettős vagy többszörös rendszerekben helyezkedik el, ahol több csillag kering egymás körül - másik felük pedig a Napunkhoz hasonló egyedüli égitest.

A Tejútrendszer

A csillagok nem egyenletesen elszórva találhatók a Világegyetemben, hanem hatalmas formációkba csoportosulnak, amelyeket relatíve üres térségek választanak el egymástól. Az ilyen csillagcsoportosulásokat nevezzük galaxisoknak, ezek tagjai nemcsak térben, hanem származásukat tekintve is egységet alkotnak. A galaxisokat tagjaik egymásra kifejtett gravitációs vonzóereje tartja össze. Minden egyes csillag önálló pályán kering a galaxis középpontja körül. (A csillagok mozgásának kiszámítása nem könnyű feladat, mivel nemcsak a galaxis centrumának gravitációs ereje hat rájuk, hanem a környezetükben lévő többi csillag és egyéb objektumok is.) Azt a galaxist, amelynek a mi Napunk is tagja, Tejútrendszernek nevezzük. Ez típusát tekintve spirális galaxis, kora nagyságrendileg 14-16 milliárd év. (Egyelőre nem tudjuk megállapítani, hogy horgas vagy normális spirális galaxis-e.) Érdekes megjegyezni, hogy kölcsönható galaxis, erről bővebben a „Lokális Halmaz” című fejezetben olvashatunk. Tejútrendszerünkben a látható anyag tömege nagyságrendileg 10^{11} naptömeg, míg a láthatatlan anyag mennyisége ennek kb. 10-szerese. 100-200 milliárd csillagot tartalmaz, melyek eloszlása nem egyenletes. Ezek csoportosulásai alapján ismerkedhetünk meg a Tejútrendszer fő szerkezeti egységeivel.

A korona nevű tartomány galaxisunk legutóbb felfedezett és legnagyobb kiterjedésű képződménye, átmérője 0,5-1 millió fényév. Érdekessége, hogy a benne lévő anyagot eddig még nem sikerült közvetlenül megfigyelni, mivel láthatatlan tömeg alkotja, nem bocsát ki észlelhető sugárzást. Sűrűsége kicsi, de hatalmas térfogata lévén tömege kb. 10-szerese galaxisunk látható részének - tehát ez alkotja a Tejútrendszer tömegének közel 90%-át. Jelenlétét csak gravitációs hatása révén lehet kimutatni. Amennyiben a centrumtól távolodva megmérjük a csillagok keringési sebességét, azt találjuk, hogy egy bizonyos távolság után az nem a Kepler-törvényeknek megfelelően változik. A keringési sebességük alig csökken, sőt időnként még növekszik is - ami nagymennyiségű nem látható tömeg jelenlétére utal.

A halo enyhén lapult ellipszoid alakú térrész, átmérője 150-200 ezer fényév körüli. Ritkán találhatók benne csillagok, azoknak is a többsége gömbhalmazokba csoportosul. Kis fémtartalmú, idős csillagokból áll, melyek eloszlása gömbszimmetrikus, mivel az ősi galaxis anyagának eloszlása is gömbszimmetrikus volt, amikor ezek a csillagok elsőként kialakultak. A centrum felé sűrűsödnek a csillagok és a gömbhalmazok, valamint a központ felé haladva egyre fiatalabb égitesteket találunk. Az objektumok pályája elnyúlt, nagy pályahajlású.

A fősík (szimmetriasík) Tejútrendszerünk forgássíkja, ebben a térrészben található galaxisunk látható tömegének legnagyobb része. Átmérője 100 ezer, vastagsága néhány ezer fényév körüli. Annak az ősi felhőnek az impulzuszóráját, perdületét őrizheti, amelyből a Tejútrendszer kialakult. Az itt található csillagoknak nagyobb a fémtartalma a halo csillagaihoz képest, azaz idősebbek azoknál, később alakultak ki. A látható anyag nagy része csillagok, 5-10%-a csillagközi anyag formájában van jelen a fősíkban, ennek a gázrétegnek a vastagsága 500-800 fényév. (A korongban lévő láthatatlan anyag tömege kb. 2-szerese a láthatónak.) Az égitestek pályája csak kismértékben elnyúlt és kis pályahajlású.

Tejútrendszerünk spirális galaxis, kettő vagy négy fő kart tartalmaz, a spirálkarok a fősíkban találhatók. Ezek a sávok valamivel sűrűbbek a korong többi részénél, azonban nem nagy tömegűk, hanem a bennük lévő fényes csillagok és az ezekhez tartozó közösségek (II régiók) miatt feltűnők. A fősík differenciálisan rotál (a galaxisunk centrumától távolabb lévő égitesteknek hosszabb idő kell egy keringéshez, mint a közelebbieknek), így ha a spirálkarok egyszerű anyagcsövek lennének, néhány fordulat után felcsavarodnának, széteszlanának. (A spirálkarok merevtest-szerűen keringenek, 200-250 millió év a körülfordulási idejük, vastagságuk a fősíkkal párhuzamosan 1000-6000 fényév.) Ezt a problémát úgy kerülhetjük meg, ha

feltételezzük, hogy a karok anyaga nem állandó, hanem folyamatosan változik. Eszerint olyan önfenntartó sűrűség hullámoknak kell tekinteni őket, amelyek helyi maximuma látható a fénylő karként. (A spirálkarok mozgása így egy tó felszínén terjedő hullámhoz hasonlítható - a hullám gyorsan tova terjed, a víz mégis egyhelyben marad. Bizonyos értelemben úgy is fogalmazhatunk, hogy a csillagok a spirálkarokban intersztelláris „dugóba” kerülnek. A jelenségre a következő hasonlat képzelhető el: Repülőgépről nézzük az éjszakai autópályát, melyen egyenletesen haladnak a kivilágított járművek. Van azonban néhány lassú teherautó is, amely feltartja a forgalmat. Ezek közelében megnő az autók sűrűsége, mivel idő kell ahhoz, hogy megelőzzék a teherautókat. Ilyenkor ezt a területet a repülőgépről egy sűrűbb és állandónak látszó tartományként figyelhetjük meg, ahol az autólámpák feltorlódnak - holott annak anyaga, azaz az autók folyamatosan cserélődnek.) A karokban mintegy 10%-kal megnő az anyagsűrűség a korong többi részéhez képest, a rajtuk áthaladó objektumok sebessége a karok belsejében lassabb, mint azokon kívül. A kissé összesűrűsödő gázanyagban a lassulás hatására lökéshullámok képződnek, így a körülmények kedveznek a csillagok keletkezésének.

A lapult, ellipszoid alakú mag átmérője 10-20 ezer fényév, vastagsága 4-6 ezer fényév. Itt található a Tejútrendszer látható tömegének kb. egytizede. A csillagok sűrűsége a magban erősen növekszik a centrum felé haladva. Míg a Nap környezetében, a fősíkban a látható anyag 90-95%-a esik a csillagokra, és 5-10% a csillagközi anyagra, addig a magban az intersztelláris anyag aránya kevesebb 1%-nál. Atomos formában lévő gázt alig találni a térségben, viszont sok molekulafelhő figyelhető meg. A centrum körül egy semleges hidrogénből álló forgó korong van, mely befelé haladva egyre vékonyodik, és mozgása gyorsul. A középpontban egy 8 Cs.E.-nél kisebb átmérőjű sugárforrás helyezkedik el, ennek centrumában valószínűleg egy néhány millió naptömegű fekete lyuk található. Ez egy gigantikus lefolyó mintájára szívja magába az anyagot, amely egyre nagyobb sebességgel spirálozik befelé, miközben felhevül, és erősen sugározni kezd. A fekete lyuk évente 10^{-5} - 10^{-6} naptömegnyi anyagot nyelhet el. Az anyagbehullás valószínűleg nem egyenletes, az alkalmanként előforduló nagyobb energiafelszabadulások robbanásokat okoznak - ezek hozhatják létre a centrumból nagysebességgel kifelé haladó felhőket.

A csillagközi (intersztelláris) anyag Tejútrendszerünk látható tömegének 5-10%-át alkotja. Két összetevőre bontható: csillagközi gázra és csillagközi porra, mindkettő a fősíkban koncentrálnak. A gázanyag átlagos sűrűsége a fősíkban 10^{-24} g/cm³, azaz cm³-enként átlagosan 1 atom található benne. Az anyag nagy felhőkre, és azokat elválasztó ritkább régiókra bomlik, ahol a sűrűség kb. egytizede a felhőkének. Háromféle állapotban lehet a gáz: ionizált, atomos vagy molekuláris formában. A nagytömegű csillagok erős ultraibolya sugárzásuk révén ionizálják a környezetükben lévő anyagot. Ezeket az ionizált zónákat II területeknek nevezzük, itt a hőmérséklet 10 ezer K körüli. Az ilyen ionizált buborékok anyagát és a környezetükben lévő, még nem ionizált anyagot elválasztó határvonal az ionizációs front. Ezek a határok kifelé tágulnak a térben, és összenyomják maguk előtt az anyagot. Ha sűrűbb felhőnek ütköznek, esetleg megkerülik, „körülfolyják” azt, ilyenkor jönnek létre az elefántormányoknak nevezett hosszúkás képződmények. Ezek le is fűződhetnek, ekkor már globuláknak hívjuk őket, fontos szerepet játszanak a csillagkeletkezésben. Ionizált régiókat, ködöket hozhatnak létre még a szupernóvarobbanások, illetve a vörös óriások is, burok ledobásával. Amennyiben a gázanyagot nem ionizálja sugárzás, akkor sötét felhőként figyelhető meg a csillagos háttér előtt. A semleges hidrogénfelhők 0,1-1000 naptömeg közöttiek, sűrűségük átlagosan 50 atom/cm³, hőmérsékletük 80 K körüli. Az ezeknél nagyobb, sűrűbb és hidegebb felhők a molekulafelhők, a csillagközi anyagnak mintegy fele ilyen felhők formájában található. Molekulák csak olyan sűrű felhőkben alakulhatnak ki, ahol a felhő külső rétegei elnyelik a csillagok ionizáló sugárzását. A molekulafelhők belsejében az anyagsűrűség 100 atom/cm³ feletti, tömegük általában 100 ezer naptömegnél nagyobb, méretük átlagosan 100-150 fényév,

hőmérsékletük mindössze 10 K körüli. A legnagyobb molekulafelhők tömege a többmillió naptömeget is elérheti, ezek Tejútrendszerünk legnagyobb tömegű objektumai. Sok figyelhető meg belőlük egy hatalmas gyűrű mentén, amely mintegy 15 ezer fényév távolságra veszi körül a galaxis centrumát. Ez a spirálkarokkal együtt a Tejútrendszer legaktívabb régióját alkotja csillagkeletkezés szempontjából. Sok molekulafelhővel kapcsolatos fiatal asszociáció található itt, ionizált csillagközi felhőkkel együtt. Napjainkra már közel 100 csillagközi molekulát ismerünk.

A por 1-2%-át alkotja a csillagközi anyagnak, szemcséinek átlagos mérete 0,1 mikrométer, a poranyag átlagos sűrűsége 10^{-26} g/cm³ a fősíkban. A port kétféle módon lehet megfigyelni. Egyrészt sötét ködökként, amint csökkentik a távolabbi csillagok fényét, illetve kioltják azt - valamint világító reflexiós ködökként, amikor egy vagy több közeli csillag fényét verik vissza. A porködökkel kapcsolatban hasonló jelenség figyelhető meg, mint amit már a légköri fény-szóródásnál megismertünk. A reflexiós ködök kékes színűek, mivel a rövidebb hullámhosszú fényt jobban verik vissza. (Légkörünk esetén ugyanezért látszik kéknek az égbolt.) Az inter-sztelláris elvörösödés jelensége is ugyanennek következtében jön létre: a por kiszórja a kék színt, és a csillagokról érkező fény a vörös felé tolódik. (Légkörünkben emiatt látjuk vörösnek a felkelő vagy lenyugvó Napot.) A szemcsék anyaga főleg grafitból, fagyott gázokból, szilikátokból áll, valószínűleg hideg csillagléghörökben, ledobott gázhéjakban alakulnak ki.

A csillagok életkora és a populációk

A csillagok életkorának meghatározásában azok fémtartalmára szoktunk hivatkozni. Mint azt a „Csillagok élete” című fejezetben megismertük, a héliumnál nehezebb elemek (kivétel Li, Be, B) a csillagok belsejében keletkeznek, és azok egy része a csillagok élete végén kilöködik az űrbe. Így az idő előrehaladtával fokozatosan növekszik a csillagközi anyag nehézelem-tartalma. Éppen ezért azok a csillagok, amelyek később alakultak ki, sokkal több nehéz elemet tartalmaznak. (A csillagászatban az egyszerűség kedvéért a hidrogénnél és héliumnál nehezebb elemeket fémeknek nevezik.) A csillagokat fémtartalmuk, azaz életkoruk alapján több populációba sorolhatjuk, ezek közül a két legfontosabbat érdemes megemlíteni. A II. populációba tartoznak a kis fémtartalmú, tehát idős csillagok, ezek galaxisunk életének korai szakaszában keletkeztek, főleg a haloban és a magban találhatók. Az I. populációs csillagok később jöttek létre, nagyobb a fémtartalmuk, fiatalabbak. Ezek a fősíkban helyezkednek el, Napunk is I. populációs csillag. (A megnevezés tehát megtévesztő: a II. populációs csillagok jöttek létre először, majd utánuk az I. populációba sorolt csillagok.)

Csillaghalmazok

A csillaghalmazok olyan csoportosulások, amelyekben a csillagok sűrűsége jelentősen nagyobb a környezetükre jellemző értéknél. Tagjaikat egymásra kifejtett vonzóerejük tartja össze, nemcsak térben alkotnak egységes csoportokat, hanem származásuk is közös. Két fő típusuk van: a gömbhalmazok és a nyílthalmazok.

A gömbhalmazok nevüket közel gömbszimmetrikus alakjukról kapták. Az ilyen csillagtársulásokban a csillagok száma befelé haladva erősen növekszik. A fő eltérés a nyílthalmazoktól, hogy azoknál sokkal több csillagot tartalmaznak, tagjaik száma tízezer-egymillió, méretük 20-300 fényév közötti. Teljes számuk a Tejútrendszerben valahol 200 körül lehet. Eloszlásuk gömbszimmetrikus galaxisunk magja körül, kifelé kb. 150 ezer fényéves távolságig terjednek, számuk a mag felé közeledve növekszik. Koruk 8-16 milliárd év között lehet, a galaxis II. populációs, idős objektumai közé tartoznak. A kisebb fémtartalmú, idősebb gömbhalmazok a

centrumtól távol, a nagyobb fémtartalmúak, fiatalabbak a centrumhoz közel helyezkednek el. Csillagközi anyagot csak nagyon keveset sikerült kimutatni bennük. Pályáik nagy elnyúltságúak és pályahajlásúak a mag körül, így általában a haloban tartózkodnak. Keletkezésüket pontosan nem ismerjük, nagyrészüik valószínűleg galaxisunk ősi anyagának sűrűbb csomóiból született. Akadnak azonban olyanok is, amelyek keringési iránya retrográd, a Tejútrendszerben lévő objektumok keringési irányával ellentétes - ezek feltehetőleg a galaxisunkon kívüli térből behullott felhőkből keletkeztek. A gömbhalmazok „párolognak”, azaz csillagaikat lassan elvesztik. Mivel sok tagjuk van, erős a gravitációs terük, ez pedig kicsire mérsékli a „párolgást”, a csillagok elszökését. Így élettartamuk sokkal nagyobb, mint amennyi idő a Tejútrendszer kialakulása óta eltelt. Gömbhalmazok a Tejútrendszerben már régóta nem keletkeznek.

A nyílthalmazokat elsősorban az különbözteti meg a gömbhalmazoktól, hogy azoknál sokkal kevesebb csillagot tartalmaznak, tagjaik száma néhány száz, néhány ezer. Átmérőjük átlagosan 10-20 fényév, csillagaik sokkal kevésbé sűrűsödnek a centrumban, mint a gömbhalmazokban, és alakjuk sem mindig gömbszimmetrikus. A nyílthalmazok pályái kis lapultságúak és pályahajlásúak, azaz a fősíkban fekszenek. I. populációs fiatal objektumok, jelentős fémtartalommal, sok por- és gázanyag található bennük. Mivel kevesebb csillagot tartalmaznak, mint a gömbhalmazok, a csillagok között lévő gravitációs összetartóerő is gyengébb. A halmaztagok elszökése, „párolgása” így jelentős, a nyílthalmazok átlagos élettartama néhány százmillió év. Számuk a Tejútrendszerben 15 ezer körül lehet, napjainkban is keletkeznek.

Asszociációk: nagy, a nyílthalmazoknál is kevesebb tagot számláló csoportosulások. Fiatal, nagytömegű és nagy energiakibocsátású csillagaik révén vehetők észre. Maximum néhány ezer csillagot tartalmaznak, átmérőjük 60-100 fényév közötti. A fősíkban található, I. populációs objektumok, napjainkban is keletkeznek. Tagjaikat egymásra kifejtett gravitációs erejük átmenetileg sem tudja együtt tartani, 10-20 millió év alatt szétbomlanak - ez felel viszonylag nagy méretükért is.

Napunk a fősíkban, a Sagittarius és Perseus spirálkarok között az Orion ágban található. A centrumtól 30 ezer fényévnire helyezkedik el, az elméleti fősíkhöz nagyon közel, attól mindössze 45 fényév távolságban. A Nap 220 km/s-os sebességgel kering a Tejútrendszer centruma körül, 250 millió évenként megtéve egy teljes fordulatot.

A galaxisok típusai

A Világegyetemben óriási számban léteznek Tejútrendszerünkhöz többé-kevésbé hasonló galaxisok, ezeket nevezzük extragalaxisoknak. Ebbe az osztályba tartozik minden olyan Tejútrendszerünkön kívüli objektum, amely csillagokat tartalmaz. A galaxisokat jellemzőik alapján három fő csoportba sorolhatjuk: elliptikus, spirális és szabálytalan galaxisok csoportjába. Ezek előfordulási arányát nehéz meghatározni, amennyiben a Lokális Halmaz eloszlását vizsgáljuk, akkor 49% elliptikus, 10% spirális és 41% szabálytalan galaxist találunk, valószínűleg ehhez hasonló eloszlás érvényes a Világegyetem más részeire is. (A 49% elliptikus galaxis főleg kisméretű, törpe elliptikust takar.) A galaxisok tömege rendkívül széles skálán változik, néhány százezer, millió naptömegtől 10^{13} naptömegig terjed (vagy még tovább), természetesen a galaxisok többsége a kisebbek közé tartozik. Ezeket nevezzük törpegalaxisoknak, csillagtartalmukkal egy nagyobb gömbhalmaz is felveheti a versenyt. (Méretük azonban legalább tízszer akkora, mint egy ugyanannyi csillagot számláló gömbhalmazé.) A szabálytalan galaxisok kistömegűek, az elliptikusok között akadnak kis- és rendkívül nagy tömegűek, a spirálisok szinte mindig nagytömegűek. A legutóbbi kutatások eredményei szerint sok galaxist hatalmas, láthatatlan anyagból álló korona övez, amelynek tömege többszöröse a galaxis látható tartománya által képviselt tömegnek.

Az elliptikus galaxisok, mint ahogyan azt elnevezésük is mutatja, elliptikus alakkal rendelkeznek. Megjelenésük a gömb formától egészen a lapos lencse alakig terjed (E0-E7). Széles tömegskálát képviselnek, többségük törpe elliptikus, ezek tömege csak néhány millió naptömeg, míg az óriás elliptikusok a 10^{13} naptömeget is elérhetik. (Ez utóbbiak gyakran nagy galaxishalmazok centrumában találhatók, és a környezetükben lévő kisebb galaxisok bekebelezésével folyamatosan növekednek.) Felületi fényességük és anyagsűrűségük egyenletesen csökken a centrumtól a kifelé haladva, nem rendelkeznek a spirálisokra jellemző határozott körvonalú maggal. Fontos jellemzőjük az általános vörös szín, mely a bennük található sárgás, vöröses csillagok bőségéből, illetve a kékes, fehéres csillagok hiányából ered. (A kékes, fehéres csillagok nagytömegűek, rövid életűek - ezért jelenlétük folyamatos csillagkeletkezésre utal. Sárgás, vöröses színárnyalattal pedig a kistömegű, hosszú életű csillagok rendelkeznek.) Az elliptikus galaxisok csillagai tehát idős objektumok, napjainkban már alig keletkeznek bennük csillagok. Ezt támasztja alá az a tény is, hogy rendkívül kevés csillagközi anyagot tartalmaznak. Az elliptikus galaxisok alakja globális forgó mozgásra utal, ez azonban csak látszat. A bennük található csillagok mozgásában ugyanis általában nincsen kitüntetett irány - azaz kaotikusan, „össze-vissza” keringenek a centrum körül. A legújabb megfigyelések további érdekességgel szolgáltak: kiderült néhány elliptikusról, hogy alakjuk nem is forgási, hanem háromtengelyű ellipszoid.

A spirális galaxisokra a központi mag, valamint az ezt övező korong és az abban található spirálkarok a jellemzőek. Alakjuk erősen lapult, látható anyaguk legnagyobb része korongjukban található. Tömegük és méretük nem változik olyan széles skálán, mint az elliptikusoké. A korong (fősíki) képviseli a galaxisok forgássíkját, mely jelentős impulzussal, perdülettel rendelkezik. Csillagtartalmuk alapján két fő alrendszer lehet megkülönböztetni bennük. A korongot övező közel gömb alakú ritka haloban és a korong közepén elhelyezkedő magban főleg vöröses csillagok vannak. Itt a csillagkeletkezés fő szakasza már rég lezajlott - ebben az elliptikusokra hasonlítanak. A korongban ezzel ellentétben sok fiatal csillag található, és jelentős mennyiségű csillagközi anyag - itt napjainkban is folyik a csillagkeletkezés. Két fő altípusukat érdemes megkülönböztetni. A normál spirálisoknál (S) a karok feltekeredése a mag környékén kezdődik. A horgas vagy küllős spirálisoknál (Sb) a karok egy darabig egyenesen, radiálisan haladnak kifelé, és csak később kezdenek el felcsavarodni. (A spirálisok közül kb. 20% horgas spirális.) Ezekben belül is megkülönböztetünk „jobbán” illetve „kevésbé” feltekeredett spirálkarokkal rendelkező galaxisokat (Sa, Sb, Sc illetve SBa, SBb, SBc). A szorosabb spirálkarokkal rendelkezők általában kevesebb, a lazább, nyíltabb spirálkarokkal rendelkezők több csillagközi anyagot tartalmaznak. A spirális galaxisok dinamikájáról az utóbbi években érdekes ismereteket szereztünk. Amennyiben megmérjük a galaxisok csillagjainak keringési sebességét a centrumtól kifelé haladva, azt találjuk, hogy a korong külső részében a sebesség csökkenése helyett annak állandóvá válása, időnként pedig növekedése tapasztalható. Ha ezek a galaxisok csak annyi tömeget tartalmaznának, mint amennyit bennük közvetlenül meg tudunk figyelni, akkor a külső részeknek a nagy keringési sebesség miatt már régen széjjel kellett volna repülniük. Így azt kell feltételeznünk, hogy jelentős mennyiségű láthatatlan tömeggel rendelkeznek, és ennek gravitációs tere készíti gyorsabb keringésre a csillagokat, valamint tartja meg őket pályájukon. Az ilyen láthatatlan anyag tömege kb. 10-szerese a láthatónak, és egy hatalmas korona formájában övezheti a galaxist.

A lentikuláris (S0) galaxisok az elliptikus és spirális rendszerek között átmenetet alkotnak. Koronggal és központi maggal rendelkeznek, magjuk viszont általában nagyobb korongjukhoz képest, mint a spirálisoknál. Korongjukban nincsenek felcsavarodott spirálkarok. Színük, csillagtartalmuk az elliptikusokéra emlékeztet, a csillagkeletkezés fő szakasza már jó ideje lezajlott bennük, többségük kevés csillagközi anyagot tartalmaz. Forgássíkjuk egybeesik korongjukkal, ebben a spirálisokra hasonlítanak.

Szabálytalan galaxisok (Irr) azok az objektumok, melyek nem rendelkeznek szimmetrikus felépítéssel. Méretük kicsi, tömegük általában 10 milliárd naptömeg alatti. Többnyire sok csillagközi anyagot tartalmaznak, gyakran még a spirálisoknál is többet, látható anyaguk 10-20%-át intersztelláris anyag alkothatja. Külön csoportként említhetők meg a szabálytalanokon belül a kék kompakt galaxisok, amelyek különálló II területekre, ionizált gázfelhőkre emlékeztetnek. Ezek aktív csillagkeletkezés színhelyei, sok fiatal, nagytömegű csillag alakítja ki színüket. Általában kisméretűek, tömegük néhány százmillió naptömeg, átmérőjük néhány ezer fényév. Anyaguk csak néhány százmillió évig képes „táplálni” a heves csillagkeletkezést. A szabálytalan galaxisok eredete nem ismert, nagyrésztük galaxisok közötti kölcsönhatások során leszakadt, kidobott anyagtömeg lehet.

A galaxisok típusa és csillagtartalma között - mint ahogyan az a fentiekből kiderült - összefüggést lehet felfedezni. Az elliptikusokban már rég lezajlott a csillagkeletkezés fő szakasza, a spirálisokban jelenleg is sok csillag keletkezik, és némelyik szabálytalan galaxis még a spirálisoknál is több csillagközi anyagot tartalmaz. Mindazonáltal ezek nem egy fejlődési folyamat különböző állomásait képviselik - az eltérő galaxistípusok valószínűleg más-más folyamatok révén és eltérő körülmények között jöttek létre. (Kivételes esetekben azért megváltozhat egy galaxis típusa. Ilyen eseményre kerülhet sor például, amikor két spirál-galaxis összeütközésével anyaguk összekeveredik, és elliptikus rendszert alkotnak. A galaxisok kölcsönhatásakor anyagtömegek lökődhetnek ki, ezek apró szabálytalan galaxisokként élhetnek tovább.)

A galaxisok látványa, megjelenése könnyen félrevezethet bennünket. A jelenlegi kutatások szerint sok galaxisnál a látható anyag csak kis részét képviseli a teljes tömegnek, melynek nagyobb hányada láthatatlan formában van jelen. De gyakran a látható tartomány is megtévesztheti a szemlélődőt. Ha egy spirális galaxisról készült felvételre pillantunk, két dolgot veszünk észre elsőként: a fényes magot, valamint a körülötte tekergő ugyancsak fényes spirálkarokat. Azt gondolhatnánk, hogy a korongban a csillagok nagy része a spirálkarokban található, míg az azokat elválasztó sötét térségekben csak elvétve akad egy-egy csillag - pedig a valóságban nem ez a helyzet. A spirálkarok közötti régiók közel ugyanannyi csillagot tartalmaznak, mint a karok fényes részei. A spirálkarok csupán azért feltűnőek, mert a rendkívül nagy energiakibocsátású és fényességű csillagok többsége és a velük kapcsolatban lévő gázfelhők itt találhatók. Mint azt már a „Csillagok élete” című fejezetben megállapítottuk, az ilyen objektumok mindössze 1-2%-át képviselik a csillagok teljes „nemzetségének”. Miért csoportosulnak ezek az égitestek a spirálkarokban? Ennek oka egyszerű: a spirálkarokban kismértékben megnő a csillagközi anyag sűrűsége, és a körülmények kedveznek a csillagkeletkezésnek, ezért itt sok csillag alakul ki. A nagyobb tömegű és energiasugárzású objektumok élettartama azonban rövid, így leélik életüket, mielőtt még messze jutnának a spirálkartól - azaz csak szülőhelyük közelében tündökölhetnek.

A galaxis szó hallatán többnyire olyan hatalmas objektumok jutnak eszünkbe, mint például az Androméda-galaxis. Sűrű magot, kavargó spirálkarokat, óriási csillagközi felhőket és szinte megszámlálhatatlanul sok csillagot képzelünk magunk elé. A galaxisok többsége azonban sokkal kevésbé látványos objektum. A Lokális Halmaznak 33 tagja van (l. az alábbiakban), ezek közül a legnagyobb tömegű az Androméda-galaxis és a Tejútrendszer. A halmaz összes többi galaxisa kisebb, ezek közül sok az előbbi kettőnek a kísérője. A mi kísérőgalaxisaink közül a Magellán-felhők a legismertebbek, de még ezek sem mondhatók tipikus objektumoknak. A Tejútrendszer átlagos kísérői a kisméretű törpegalaxisok, elliptikus és szabálytalan törpe csillagvárosok. Ezek mindössze néhány millió csillagot tartalmazó rendszerek, csillagtartalmukkal egy nagyobb gömbhalmaz is felveheti a versenyt. A galaxisok nagyrészt ilyen törpék alkotják, mennyiségük körülbelül egy nagyságrenddel haladja meg a miénkhöz

hasonló méretű galaxisok számát. Természetesen annak ellenére, hogy számuk hatalmas, az általuk birtokolt tömeg kicsi.

Tejútrendszerünk tehát tekintélyes galaxis, azonban azt sem szabad hinni, hogy rendkívüli objektum lenne. Akárcsak a csillagok esetében, ha messzebbre tekintünk, itt is észrevehetjük, hogy hozzánk hasonló méretű galaxisokból még sokmillió van szétszórva a Világegyetem általunk megfigyelt részében. Sőt olyanok is akadnak, melyek tömege jócskán felül is múlja a mienkét. Amikor egy távoli galaxishalmazról készült felvételt nézünk, jusson mindig eszünkben, hogy csak a legfényesebb galaxisok hagytak nyomot fotólemezeinken. A halványabbak, melyek száma nagyobb, egyáltalán nem látszanak. Ugyanígy a felvételeken általában csak a fényesebb belső része látható a galaxisoknak. Az utóbbi évek kutatásai egy még érdekesebb ismerettel szolgáltak: nemcsak a kis galaxisok között találunk halványan pislákolókat, hanem a nagyobbak, a Tejútrendszerünkkel megegyező méretűek között is. Ezeket Kis Felületi Fényességű (Low Surface Brightness) galaxisoknak nevezik, minden típusban előfordulnak. Olyan objektumok lehetnek, amelyekben valamilyen okból kifolyólag rendkívül gyenge a csillagkeletkezés.

A Lokális Halmaz

A galaxisok nem egyenletesen elszórva találhatók a Világegyetemben, hanem 80-90%-uk csoportokba rendeződik, ezeket nevezzük galaxishalmazoknak. Az a galaxishalmaz, melynek a Tejútrendszerünk is tagja, a Lokális Halmaz.

A Lokális Halmazt a benne lévő galaxisok egymásra kifejtett kölcsönös gravitációs vonzó hatása tartja össze, így nem vesznek részt a Világegyetem általános kozmológiai tágulásában. A rendszer átmérője 5 millió fényév körüli, jelenleg 33 tagját ismerjük, a teljes szám ennek az értéknek a kétszerese körül lehet. Ez a 33 galaxis típusát és tömegét tekintve nem egyforma. A Lokális Halmazt két hatalmas objektum uralja: Tejútrendszerünk és a szabadszemmel is könnyen megpillantható Androméda-galaxis (M31). Ez a halmaz felépítésében is megfigyelhető: a többi galaxis nagy része ugyanis ezek körül kering kísérőgalaxisokként.

A Tejútrendszeréről már olvashattunk, vizsgáljuk most meg az M31-et. Az Androméda-galaxis a Lokális Halmaz legnagyobb tagja, Tejútrendszerünkhöz hasonlóan spirális galaxis. Átmérője kb. másfélszerese a miénknek, tömege pedig mintegy kétszerese. A Tejútrendszerrel együtt ennek a két óriás galaxisnak a gravitációs hatása dominál a rendszerben, melynek középpontja kb. félúton van a két galaxis között. A Lokális Halmazban a harmadik spirális galaxis az M33 jelzésű, ez a harmadik legnehezebb tagja a rendszernek. Átmérője azonban csak 20 ezer fényév, tömege tizede a Tejútrendszerének. A többi galaxis között egy nagyobb elliptikust találunk, az M32-t, a „maradéknak” pedig fele törpe elliptikus, fele pedig szabálytalan galaxis. Az ilyen törpegalaxisok csak néhány százezer csillagot tartalmaznak, azaz csillagtartalomban egy nagyobb gömbhalmaz is felveheti velük a versenyt. (Méretben azonban nagyobbak a gömbhalmazoknál, így centrumukban kisebb a csillagok sűrűsége.)

Tejútrendszerünknek 11 kísérőgalaxisát fedezték fel eddig, közülük a legnagyobbak a Kis- és a Nagy Magellán-felhők, mindkét objektum megfigyelhető szabadszemmel a déli égen. A Nagy Magellán-felhő szabálytalan galaxisként van kategorizálva, bár spirális jellegű belső szerkezettel is rendelkezik. Távolsága 160 ezer fényév, tömege kb. 10 milliárd naptömeg. A Kis Magellán-felhő távolsága 200 ezer fényév, tömege mintegy 2 milliárd naptömeg körüli. (Mindkét Magellán-felhőnek bonyolult felépítése van, ezt egyelőre nehéz pontosan meghatározni.) A valóságban csak egy-egy nagyobb csomóját képviselik a Magellán-áramlásnak, amely egy 300 ezer fényévnél is hosszabb, átlagosan 15-30 ezer fényév széles gázfelhőkből és csillagokból álló szalag a déli galaktikus pólus felett, helyzete közel merőleges a Tejútrendszer fősíkjára. Az áramlás alakja erősen deformálódott a Tejútrendszer és a Magellán-felhők gravitációs

hatására. Galaxisunk valószínűleg befogta az ősi Magellán-galaxist, amikor az túl közel haladt el mellette, és amióta elkezdett körülötte keringeni, folyamatosan anyagot szakítottunk le róla. Ezek alkotják a Magellán-áramlást, közülük sok felhő nagysebességgel közeledik a Tejútrendszerhez. A Magellán-felhőket galaxisunk egyébként a távoli jövőben el is fogja nyelni, anyaga a miénkkel összekeveredik. A Magellán-felhők gravitációs hatása némileg torzít a Tejútrendszer alakján. Ennek eredménye szabadszemmel is megfigyelhető: a nyári és a téli ég legfényesebb csillagai nem a Tejútban helyezkednek el (Gould-öv).

A galaxisok közötti kölcsönhatások egyébként egyáltalán nem ritkák. Környezetünkben a galaxisoknak legalább 10%-a kölcsönható rendszer, többek között a mi Tejútrendszerünk is. A kölcsönhatások során többé-kevésbé látványosan eltorzítják egymás alakját, közeli elhaladások alkalmával nagy anyagtömegeket téphetnek le egymásról. „Frontális” ütközések esetén hatalmas „csóvákat” lövellhetnek ki, és az eredetileg két külön csillagváros teljesen összeolvadhat. Ilyenkor az ütköző galaxisok csillagközi anyaga heves csillagkeletkezés színhelye lesz, gyakran jönnek létre óriási halmazok, kivételes esetekben kialakulhat két egymással szemben keringő csillaggeneráció is. Régebben, a Világegyetem fiatalabb korában a jelenleginél sokkal gyakoribbak voltak a kölcsönhatások - sőt akkoriban azok a csillagvárosok számítottak kivételesnek, amelyek éppen nem vettek részt semmilyen vad kölcsönhatásban.

Tejútrendszerünk is kölcsönható galaxis. Valószínűleg egy nagyobb kölcsönhatás-sorozat játszódtott le mintegy 5 milliárd évvel ezelőtt a Lokális Halmazban. Két galaxispár haladt át halmazunkon, melyek túlságosan közel kerültek a nagytömegű Andromédához. A két galaxispárból egy-egy bezuhant az Andromédába, míg párjaik nagysebességgel kilöködtek a rendszerből. (Az egyik bezuhant és „emésztésnek” indult galaxis maradványa lehet az Androméda nemrég felfedezett kettős magjának egyik komponense.) Ez a két kilövellt objektum lehet a Maffei-1 elliptikus és az IC 342 spirális galaxis, melyek nagysebességgel távolodnak a Lokális Halmaztól. A vad kölcsönhatás során galaxis „repeszek” repültek széjjel, melyekből Tejútrendszerünknek is kijutott - ezek lehetnek a Magellán-felhők és a Leo I. nevű kísérő-galaxisunk. Természetesen az imént vázolt eseménysor még megerősítésre szorul.

A Lokális Halmaz látható tömege kb. 650 milliárd naptömeg, ennek mintegy 70%-a az Andromédában és a Tejútrendszerben összpontosul. Amennyiben a láthatatlan anyagot is figyelembe vesszük, a valódi tömeg ennek az értéknek kb. tízszerese lehet.

A Lokális Halmaz a kisebb, kevés galaxist tartalmazó ún. irreguláris halmazok közé tartozik, nincs jelentős központi kondenzációja vagy óriás domináns galaxisa. Vele ellentétben a reguláris halmazok sokkal több galaxist tartalmaznak, nagyobb a tömegük, centrumukban pedig galaxisokból álló sűrű mag található. A középpontban gyakran egy rendkívül kiterjedt és fényes elliptikus jellegű óriásgalaxis helyezkedik el. Az ilyen furcsa galaxisoknak a tömege 30-50-szerese is lehet Tejútrendszerünkének (szuperóriás diffúz - cD - galaxisok). Gyakran többszörös maggal rendelkeznek, a környezetükben lévő kisebb galaxisokat bekebelezzik. Ez az osztályozás természetesen elég durva, sok átmeneti és különböző sajátos galaxishalmaz-típust különböztethetünk meg. A halmazok jellege és fényes galaxisaik típusa között összefüggést lehet felfedezni. Míg a nagy, domináns galaxisokkal rendelkező halmazok fényesebb galaxisai főleg elliptikusak (E) és lentikulárisak (S0), addig az ilyen domináns galaxisok nélküli halmazok fényes tagjai főleg spirálisok. Egyelőre nem tudjuk, hogy a halmazok galaxistartalma milyen folyamatok révén alakul ki. Valószínűleg fontos szerepet játszik ebben a halmaz anyagának eredeti sűrűsége, és a tagok közötti kölcsönhatások gyakorisága, ereje. A galaxishalmazok tagjainak száma széles skálán változhat, néhányszor tíztől több ezerig terjedhet. A Világegyetem legnagyobb gravitációsan kötött képződményei - amelyek nem vesznek részt az általános kozmológiai tágulásban - a rendkívül gazdag reguláris halmazok, ezek átmérője 10-30 millió fényév.

Szuperhalmazok

A galaxishalmazok sem egyenletesen elszórva találhatók a térben, hanem nagyobb csoportosulásokat alkotnak - ezeket nevezzük szuperhalmazoknak. Felépítésük nem gömbszimmetrikus vagy enyhén lapult, hanem éppen ellenkezőleg: rendkívül elnyúlt illetve lapos formával rendelkeznek. Hihetetlen formagazdagságot mutatnak: hosszú fonalak, láncok formájában, lapok, buborékok felületei mentén rendeződnek bennük a galaxishalmazok illetve galaxisok. Méretük széles skálán változik: néhányszor tízmillió fényévtől több százmillió fényévig terjedhet, átlagosan 100 millió fényév. Amikor a Világegyetemet nagy léptéken vizsgáljuk, észrevehetjük, hogy a szuperhalmazok hatalmas buborékszerű ürességek felületein, azok találkozásainál helyezkednek el. A buborékok jellegzetes mérete szintén százmillió fényév, azonban sokkal nagyobb térfogatot töltenek ki, mint a lapos, keskeny szuperhalmazok, melyek a Világegyetem térfogatának nagyjából 5%-át alkotják. Ezeknek a buborékszerű képződmények belsejében a látható anyag (és valószínűleg a láthatatlan is) elég ritka, csak elszórva találunk egy-egy galaxist. A szomszédos ürességek, buborékok, valószínűleg egymással összekapcsolódnak, egymásba nyílnak. Ehhez hasonlóan lehetséges és néhány esetben már észlelésekkel alátámasztott, hogy a szuperhalmazok összeérhetnek, rendkívül hosszú képződményeket alkotva. Ilyen például a Nagy Fal nevű formáció, mely több összekapcsolódó (vagy egy hatalmas) szuperhalmaz. Ennek kb. 500 millió fényév hosszú szakaszát ismerjük, vastagsága általában nem haladja meg a 15 millió fényévet. Elképzelhető, hogy mérete ennél is nagyobb, a jelek szerint ugyanis a feltérképezett zóna határán túl is folytatódik.

Azt a szuperhalmazt, amelynek a Lokális Halmaz is tagja, Lokális Szuperhalmaznak, illetve Virgo Szuperhalmaznak nevezzük. Ez felépítése alapján három fő komponensre bontható: magja a tőlünk 50 millió fényév távolságban lévő Virgo galaxishalmaz. Ez egy rendkívül gazdag, sokezer galaxist tartalmazó rendszer, a Lokális Szuperhalmaz fényes galaxisainak 20%-a itt található. Ezt veszi körül több galaxishalmaz felhője, melyek nagyjából egy korongot alkotnak. Itt található a Lokális Szuperhalmaz fényes galaxisainak 40%-a. A korong több nagy galaxishalmazból álló elnyúlt felhőt tartalmaz, melyek a központi Virgo felől ágaznak szét. Ezek a Virgo II., Virgo III., Canes Venatici, Leo II. és Crater-felhők. A maradék fényes galaxisok 40%-a egy kiterjedt, ritka felhőben található, ami az előbbi képződményeket veszi körül. A Lokális Szuperhalmaz átmérője 80-100 millió fényév, mintegy százezer galaxist tartalmazhat, Lokális Halmazunk ezen belül a Canes Venatici felhőben van, a peremterületeken.

Ha a Lokális Halmaznak, illetve Lokális Szuperhalmaznak a mozgását akarjuk megvizsgálni, akkor a kozmikus háttérsugárzást használhatjuk kiindulópontként. Ennek hőmérsékleteloszlása arra utal, hogy kb. 600 km/s-os sebességgel haladunk a Hydra és Centaurus csillagképek által kitűzött irányba. Amennyiben számba vesszük az összes ismert mozgást környezetünkben (a Föld kering a Nap körül, a Nap kering a Tejútrendszer centruma körül stb.), és azokat ebből levonjuk, még mindig jelentős érték marad, amit nem tudunk megmagyarázni. Ezért arra a következtetésre jutunk, hogy a Lokális Halmaz és az egész Lokális Szuperhalmaz adott sebességgel mozog ebbe az irányba. A mozgás kiváltó oka egy hatalmas, mintegy 300 millió fényév távolság körül elhelyezkedő tömegkoncentráció lehet, melyet Nagy Vonzónak (Great Attractor) neveznek. Ez egy relatíve ritka anyagszűkeződés, a benne található galaxisok ugyanis nem alkotnak egy sűrűbb központot, hanem egy hatalmas térfogatban, többé-kevésbé egyenletesen vannak elszórva. Ennek a képződménynek látszólagos átmérője bolygónkról nézve 60 fok körüli, a déli égen található. Ezidáig csak 7500 galaxist sikerült felfedezni, melyek valószínűleg ehhez a képződményhez tartoznak. A Nagy Vonzó teljes tömege kb. ötvenezeresére lehet Tejútrendszerünkének, itt is az anyag nagy része valószínűleg láthatatlan formában van jelen.

A szuperhalmazok a Világegyetem jelenleg ismert legnagyobb alakzatai, a látható anyag nagy része (és valószínűleg a láthatatlan is) ilyen formációkba csoportosul. Jelenleg a Világegyetem mintegy 10 milliárd fényév sugarú tartományát figyelhetjük meg. Az Univerzum átlagsűrűsége 10^{-29} - 10^{-30} g/cm³ körüli.

Láthatatlan tömeg

A láthatatlan tömeg (hiányzó tömeg, sötét tömeg) fogalma a harmincas évek környékén jelent meg. Olyan anyagot szoktak ezzel a megnevezéssel illetni, amely egyáltalán nem vagy csak nagyon gyengén hat kölcsön a „normális” (barionikus) anyaggal. Így nem bocsát ki sugárzást, amit fel tudnánk fogni, innen a láthatatlan elnevezése. Csak gravitációs kölcsönhatása révén tudjuk kimutatni, erre utal a tömeg elnevezés. Létezésére az alábbiak mutatnak: A Tejútrendszerben, a galaktikus síkra közel merőlegesen mozgó csillagok vizsgálatából a fősíkban elhelyezkedő anyag mennyiségére tudunk következtetni. Ezeknek az égitesteknek mozgása arra utal, hogy az itt található anyag tömege nagyjából kétszerese annak az értéknek, amelyet a látható anyag alapján várhatnánk.

A galaxisok forgása sok esetben gyorsabb, mint az a bennük látható anyagból következne. Amennyiben megmérjük pl. egy spirális galaxis korongjában lévő csillagok keringési sebességét, a centrumtól kifelé haladva adott távolság után annak csökkenését kellene tapasztalnunk. A megfigyelések ezzel ellentétben arra utalnak, hogy a keringési sebességek egy bizonyos távolság után közel állandóak maradnak, sőt időnként még növekednek is. A csillagok keringése ezekben a régiókban annyira gyors, hogy ha csak akkora anyagmennyiség lenne a galaxisban, mint amennyit láthatunk, a gravitáció nem tudná megtartani a csillagokat, és azok szétrepülnének. Ez a jelenség láthatatlan tömeg jelenlétére utal. Az elliptikus galaxisok körül megfigyelhető röntgensugárzó forró gázanyagot sem tudná megtartani az objektum, ha csak akkora tömege lenne, mint amennyit láthatunk. A megfigyelések arra utalnak, hogy a nagyobb spirális és elliptikus galaxisok tízszer, százszor annyi láthatatlan anyagot tartalmaznak, mint láthatót. Ez valószínűleg egy kiterjedt koronának nevezett tartományban található, amely jelentősen nagyobb a galaxis látható részénél.

A kísérőgalaxisok sebessége ugyanúgy elárulja anyaggalaxisuk tömegét, mint ahogyan egy hold keringési sebessége is elárulja bolygója tömegét. A Tejútrendszer kísérőinek sebessége arra utal, hogy galaxisunk kb. 6-10-szer annyi láthatatlan anyagot tartalmaz, mint láthatót. Ha a galaxishalmazok annyi anyagot tartalmaznának, mint amennyi bennük látható, gyakran csak átmeneti anyagcsoportosulások lennének. Tagjaik gyors mozgásuk miatt nem tudnának együtt maradni, és lassanként szét kellene szóródniuk. Ahhoz, hogy olyan erős gravitációs vonzást tételezzünk fel, ami egyben tudja tartani a halmazokat, 10-20-szor annyi láthatatlan anyagnak kell jelen lennie, mint láthatónak.

Gravitációs lencsék: A fénysugár a gravitációs térben elhajlik. A közeli, nagytömegű objektumok mögött, azok irányában távol elhelyezkedő égitestekről érkező fény útja megváltozik. A háttérobjektumok képének eltorzulásából, megtöbbszöröződéséből a köztes, lencseként működő objektum tömegére lehet következtetni. Ezek a megfigyelések arra utalnak, hogy a galaxishalmazokban legalább tízszer annyi láthatatlan anyag van, mint látható.

A láthatatlan anyagra több „gyanúsítottunk” is van, ezeket két fő csoportba lehet sorolni. Az egyik csoportba a „normál”, barionokból álló anyag tartozik, ez esetben a láthatatlan tömeget ugyanolyan anyag építi föl, mint a láthatót - ám az valamilyen okból kifolyólag nem sugároz, vagy csak nagyon gyengén teszi azt. Ilyenek lehetnek pl. barna törpék, fekete lyukak, gyengén pislákoló törpecsillagok, kialudt fekete törpék. A másik nagy csoportba a nem barionikus természetű anyag tartozik, ezen belül is két alcsoportot lehet megkülönböztetni. A „forró” anyag közel fénysebességgel mozgó részecskéket tartalmaz (pl. tau neutrínó), míg a „hideg”, a

fénysebességnél lényegesen lassabban mozgó képzeletbeli részecskékből áll (WIMP-ek, axionok stb.).

Ennek anyagnak az összetételére utalást kaphatunk, amennyiben a Világegyetem deutérium-eloszlását vizsgáljuk. A deutérium akkor keletkezett az Univerzumban, amikor az az ős-robbanás után kb. három perccel egy hatalmas csillagként működött. Amennyiben nagy a barionsűrűség, sok deutérium alakul héliummá, ha kicsi a barionsűrűség, több deutérium marad meg. A Világegyetem jelenlegi deutérium-eloszlása arra utal, hogy a láthatatlan tömegnek csak kis részét (4-10%-át) alkothatja barionikus anyag, a többit valamilyen ismeretlen részecskének vagy részecskéknak kell fölépíteniük. Az Univerzum jelenlegi ismereteink szerint pont a nyílt és a zárt geometria közötti határ környékén mozog. A látható anyag az ehhez szükséges sűrűséget, tömeget messze nem tudja létrehozni, a Világegyetem anyagának ezért 90-99%-a láthatatlan formában kell, hogy jelen legyen.

A Világegyetem keletkezése

A tudomány mai állása szerint Világegyetemünk az ősrobbanással kezdődött. Ekkor jött létre a tér és az azt kitöltő anyag, a $T=0$ pillanatot tekintjük az Univerzum kezdetének. Időpontját jelenlegi ismereteink 15-20 milliárd évvel ezelőtre teszik.

Az ősrobbanás bizonyítékai

Az ősrobbanás elmélete három fontos megfigyelésre ad magyarázatot. Ezek az általános kozmológiai tágulás, a kozmikus háttérsugárzás és a Világegyetemben található nagymennyiségű hélium eredete. Az általános kozmológiai tágulás (Hubble-tágulás) értelmében az egész Világegyetem tágul, azaz a benne lévő testek mindegyike távolodik az összes többitől. Amennyiben ezt a tágulást visszafelé vezetjük, egymáshoz egyre gyorsabban közeledő galaxisokat kapunk, melyek anyaga a kezdő pillanatban egyetlen pontban volt. A tágulás kis méretskálán nem figyelhető meg: a csillagok nem távolodnak egymástól, és a galaxishalmazokat alkotó egyes galaxisok sem repülnek szét - a tömegükből adódó gravitációs tér ugyanis ezt megakadályozza. Azonban ha messzebb tekintünk, és a Lokális Halmazon kívüli galaxisokat vizsgálunk, észrevehetjük, hogy mindegyikük távolodik tőlünk, mégpedig minél messzebb helyezkednek el, annál nagyobb sebességgel. Ez persze nem azt jelenti, hogy mi vagyunk a Világegyetem középpontjában, ugyanis bármely galaxisban helyezkednénk is el, az összes többit attól az egytől látnánk távolodni. (A jelenség hasonló ahhoz, amit pl. egy kemencében dagadó kalács belsejében képzeletben megfigyelhetnénk. A kalácsban lévő mazsolák mind távolodnak egymástól, de bármelyikükön is helyezkednénk el, az összes többit attól az egytől látnánk távolodni. A folyamat érzékeltetésére gyakran szokták még a luftballon hasonlatot alkalmazni, ebben az esetben a háromdimenziós teret egy két-dimenziós ballon felszínével szemléltetjük. Ennek a felületére ragasztunk rá kis papír korongokat, amelyek a galaxisokat szemléltetik. Ha felfújjuk a luftballont az összes korong távolabb kerül az összes többitől. Bármelyik korongról is néznénk a jelenséget, az összes attól az egytől látszana távolodni - holott mindegyikük egyenrangú. Természetesen a luftballon felületén élők számára az a térdimenzió, amibe beletágul, nem létezik.)

A kozmikus háttérsugárzás a Világegyetemet kitöltő 2,73 K-es hőmérsékletű elektromágneses sugárzás, amely minden irányból közel egyenletesen érkezik. Ez az ősrobbanás után néhány százezer évvel keletkezett, amikor a Világegyetem hőmérséklete kb. 5000 K alá csökkent. Ekkor már elegendően alacsony volt a hőmérséklet ahhoz, hogy az atommagok elektronokat foghassanak be, és megszületett az atomos anyag. Ezzel a sugárzás elvált az anyagtól - azaz a Világegyetem átlátszó lett a sugárzásra nézve. A tágulással párhuzamosan fokozatosan csökkent ennek a „fotontengernek” hőmérséklete, amely mára elérte a 2,73 K körüli értéket. A kozmikus háttérsugárzás az Univerzum ősi hőmérsékleti egyensúlyának maradványa. A harmadik tényező, ami az ősrobbanásra és a forró Univerzum elméletre utal, hogy a Világegyetem látható anyagának kb. 25%-a hélium. Ilyen nagy héliummennyiséget egyszerűen nem gyárthattak le a csillagok a Világegyetem keletkezése óta eltelt idő alatt. Éppen ezért ennek a 25%-nak ősi eredetűnek kell lennie. Akkor keletkezett, amikor kb. három perccel az ősrobbanás után az egész Világegyetem egy hatalmas csillagként működött.

A felfúvódó Világegyetem

Ahogy az ősrobbanás, azaz a $T=0$ időpont után a Világegyetem tágult, a tágulással együtt csökkent hőmérséklete - ezzel párhuzamosan változtak fizikai jellemzői. Az alábbiakban időrendi sorrendben próbáljuk áttekinteni a fontosabb eseményeket. Amikor az Univerzum kezdeti, rendkívül forró és nagysűrűségű állapotát vizsgáljuk, a kvantumelméletre és az általános relativitás elméletére támaszkodunk. Mivel ennek a két fontos teóriának egyesített elmélete még nem született meg, így meglehetősen bizonytalanok vagyunk a legelső pillanatokkal kapcsolatban. Ahhoz, hogy betekintést nyerhessünk a kezdő másodpercekbe, el kell sajátítanunk néhány fontos részecskefizikai ismeretet.

Egyesített kölcsönhatások

A részecskefizika mai álláspontja szerint a környezetünkben megfigyelhető négy alapvető kölcsönhatás: az elektromágneses, a gyenge, az erős és a gravitációs, mind-mind ugyanannak az egy, alapvető kölcsönhatásnak különböző megnyilvánulásai. Ezt nevezik Nagy Egyesítés Elméletének, melynek keretében az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatásról már sikerült bebizonyítani, hogy ugyanannak az éremnek különböző oldalai. Feltehetőleg a többi kölcsönhatás is egységet képez bizonyos magas hőmérsékleteken és energiákon. A Világegyetem kezdeti pillanataiban ezért ezek még egy egységes formát alkottak, majd amint az Univerzum hűlt, sorra váltak szét egymástól. (A jelenségre a következő hasonlat is elképzelhető: Amíg egy rulettkerék gyorsan pörög, azaz nagy energiája van, a golyó egyetlen lyukba sem eshet be. Amint azonban az energia és a pörgés sebessége csökken, a golyó már beleeshet a különböző lyukakba - azaz ekkor már többféle energiaállapotba kerülhet.) A magas hőmérsékletű anyag viselkedésénél az egyesített kölcsönhatások mellett a párkeltés mechanizmusát is érdemes ismernünk.

Párkeltés

A fizikában megkülönböztetünk anyagot és antianyagot, minden anyag részecskének megvan a maga ellentétpárja. Ilyen például az elektron-pozitron, proton-antiproton stb. (Egyes részecskéknél a kettő megegyezik.) Amennyiben egy részecske és egy antirészecske találkozik, azok megsemmisülnek, szétsugárzódnak, szakkifejezéssel annihilálódnak. A jelenség fordítottja is elképzelhető: egy nagyenergiájú sugárzás részecske-antirészecske párt kelthet - ezt nevezik párkeltésnek. A Világegyetem kezdeti pillanataiban a magas hőmérsékleten és nagy energiákon gyakoriak voltak a párkeltések. Minden részecske rendelkezik egy bizonyos küszöbhőmérséklettel, amelyet ha felfelé átlépünk, adott időegység alatt ugyanannyi részecske-antirészecske pár keletkezik, mint amennyi megsemmisül - azaz a párkeltés és az annihiláció egyensúlyban van. Éppen ezért a korai állapotok vizsgálatát az is bonyolítja, hogy a fenti folyamatok következtében rendkívül sok részecske volt jelen, amelyek hevesen keletkeztek és semmisültek meg. Amint csökkent a hőmérséklet, sorban értünk az egyes részecskék küszöbhőmérséklete alá, ahol az annihiláció jutott túlsúlyra, és a kérdéses részecskék megsemmisítették egymást. A részecskefizika egyes törvényeinek szimmetriasértő mivolta következtében valamivel több anyag keletkezett, mint antianyag. Ez a kis többlet az annihiláció után visszamaradt - és ez alkotja ma többek között a Tisztelt Olvasó testét is.

A fenti ismeretek fényében most már valóban megkezdhetjük az Univerzum kezdeti pillanatainak rekonstruálását. Sajnos nem indulhatunk a 0 időponttól, az ősrobbanást ugyanis 10^{-43} másodpercnél jobban nem tudjuk megközelíteni két tényező miatt. Egyrészt ez a Planck-

időtartam, ahol a határozatlanság elve a további kutatások útjába áll. (Bizonyos értelemben létezik legrövidebb idő: a Planck-idő, legkisebb méret: a Planck-méret és legkisebb tömeg: a Planck-tömeg. Ezeknél kisebb egységek vizsgálatakor a határozatlanság elve elmosza a tényeket, jellemzőket. Ahogyan mondani szokták: egy Planck-határ alatti Világegyetem létezése nem különbözik önmaga hiányától.) Másrészt a 10^{-43} másodpercnél korábbi állapotoknál, 10^{94} g/cm³ sűrűség felett a kvantumgravitáció egyesített elméletére lenne szükségünk, amelyet még nem alkottak meg.

Ahogy tágult a Világegyetem és csökkent a hőmérséklete, sorra váltak szét az egyes kölcsönhatások. Elsőként a gravitációs kölcsönhatás vált le a többitől, ez kb. 10^{-43} másodperccel történt az ősrobbanás után. 10^{-34} - 10^{-35} másodpercnél az erős kölcsönhatás vált szét az egyesített elektromágneses és gyenge kölcsönhatástól. Ezt a különválást egy olyan drasztikus jelenség követte, amely döntő hatással volt a Világegyetem későbbi állapotára - ekkor kezdődött meg a felfúvódás időszaka (inflációs korszak). A felfúvódási időszak során, mint ahogyan azt az elnevezés is mutatja, az egész Világegyetem robbanásszerű táguláson ment keresztül, 10^{-32} - 10^{-30} másodpercre nagyságrendileg 10^{50} -szeresére növekedett térfogata. Ekkor a Világegyetem a fény sebességénél is sokkal gyorsabban tágult. Az általános relativitás elmélete szerint sem anyag sem energia nem terjedhet a féynél nagyobb sebességgel. Itt azonban nem is mozogtak gyorsan a részecskék, egyszerűen a tér robbanásszerű tágulása vitte szét őket. (A felfúvódás bizonyos értelemben egy folyadék túlűtéséhez hasonlít, a vizet is nulla fok alá tudjuk hűteni bizonyos körülmények között anélkül, hogy megfagyjon. A Világegyetem is túlűtött állapotba került, majd egy fázisátmenet szerű folyamat során olyan energiaszabadulás történt, amely robbanásszerű felfúvódáshoz vezetett.) Ekkor, a felfúvódás során keletkezett a Világegyetem anyagának legnagyobb része. A felfúvódás elmélete értelmében az egész Világegyetem mérete sokkal nagyobb, mint amekkora részt mi láthatunk belőle.

A felfúvódás elmélete két problematikus tényezőre ad egyszerű magyarázatot, ezek simasági- és horizontprobléma néven ismeretesek. A simasági probléma abból adódik, hogy a Világegyetem anyagsűrűsége éppen a kritikus érték körül mozog, azaz geometriája a síkhoz van közel. Amennyiben az Univerzum anyagsűrűsége csak kicsit lenne alacsonyabb a kritikus értéknél, az a múltban olyan gyorsan tágul, hogy alig keletkezhetek volna benne galaxisok. Amennyiben sűrűsége kissé nagyobb lenne a kritikus értéknél, nem sokkal keletkezése után már vissza is zuhant volna. Ahhoz, hogy a Világegyetem geometriája ennyire közel álljon a síkhoz, mint amennyire azt ma megfigyelhetjük, nem sokkal az ősrobbanás után már ahhoz rendkívül közel kellett lennie. Ehhez, kb. $1:10^{58}$ pontosságú beállítás szükséges 10^{-44} másodpercnél - azaz nagyon erősen meg vannak szorítva a kezdő feltételek, amelyekből ilyen Világegyetem keletkezhet. A felfúvódás bizonyos értelemben kisimítja a Világegyetemet, és így megoldja a simasági problémát. (A jelenséghez hasonló az egyszerű folyamat, melynek keretében rendkívül nagyra fújunk egy luftballont. Annak felülete egy rajta lévő megfigyelő szemszögéből vizsgálva egy idő után már nehezen lesz megkülönböztethető a síktól. A Föld felszíne is síknak tűnik, ha rajta helyezkedünk el.) A felfúvódás előnye tehát, hogy különböző kezdő feltételekből a megfigyelthez hasonló Világegyetemet tud létrehozni. A horizontprobléma az alábbiakat tartalmazza: amennyiben megvizsgáljuk a háttérsugárzás intenzitás-eloszlását, azt rendkívül egyenletesnek találjuk, még az ég két átellenben lévő pontján is. Az ősi Világegyetemben azonban csak azok a régiók lehettek egymással hőmérsékleti egyensúlyban, melyek kapcsolatba kerülhettek, kölcsönhathattak. A fény véges terjedési sebessége miatt ez korlátozott méret, ezt nevezzük horizonttávolságnak. A felfúvódás itt is enyhít a kezdő feltételeken: a Világegyetem ma megfigyelhető része valamikor annyira kis térfogatú volt, hogy belül lehetett saját horizonttávolságán - az egyensúlyban lévő részeket pedig a felfúvódás vitte széjjel.

10^{-12} másodperccel az ősrobbanás után vált szét az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás. Amint hűlt a Világegyetem, fokozatosan jutott az egyes részecskék küszöbhőmérséklete alá. Ezek egymást megsemmisítve sugárzássá váltak, és az antianyag felett kis többletben lévő anyag maradt fenn. A hőmérséklet csökkenésével párhuzamosan egyre bonyolultabb szubatomi szerkezetek épülhettek fel. Amikor egymilliárd fok alá hűlt az Univerzum (a harmadik perc után nem sokkal), az egy protonból és egy neutronból álló deutérium atommagok már egyben maradhattak. (A héliummagokat létrehozó fúziós folyamatok első lépcsőfoka a deutériummag.) Ekkor az egész Világegyetem egyetlen csillagként működött, heves fúziós folyamatok keretében a barionikus („normál”) anyag 25%-a héliummagokká alakult. (Bővebben lásd „Az elemek keletkezése” című részt.) A nukleonszintézis maximum néhány percre tartott, majd ezután hosszú ideig semmilyen fontosabb esemény nem történt. Ezalatt az anyag és a sugárzás mindvégig rendkívül szoros kölcsönhatásban és egyensúlyban volt egymással.

A helyzet változatlan maradt egészen 300-500 ezer évig, amikor a hőmérséklet 4000-5000 K körüli érték alá nem csökkent. Ekkor már az atommagok elektronokat is megtarthattak, és így létrejött az atomos anyag. A sugárzás elvált az anyagtól, a Világegyetem átlátszó lett. Ennek a sugárzásnak a hőmérséklete a továbbiakban is a Világegyetem tágulásával párhuzamosan csökkent, mára pedig elérte a 2,73 K-es szintet. Ezt nevezzük kozmikus háttérsugárzásnak, amely arról tanúskodik, hogy a Világegyetemben valamikor hőmérsékleti egyensúly uralkodott. A szétválás után az anyag különböző formációkba kezdett csoportosulni - melynek gyümölcsét napjainkban élvezzük.

A galaxisok keletkezése

A Világegyetem nagyléptékű alakzatainak kialakulását magyarázó elméleteket két nagy csoportba lehet sorolni. Az egyik szerint a galaxisok voltak az elsőként kialakult anyagsomók. Ezek a későbbiekben egymásra kifejtett gravitációs vonzásuk hatására egyre nagyobb csoportokba, halmazokba tömörültek. A másik csoportba tartozó elméletek szerint a folyamat fordított sorrendben játszódott le. Először a legnagyobb alakzatok jöttek létre, majd a továbbiakban ezek összehúzódásával, darabolódásával keletkeztek az egyre kisebb képződmények, végül az egyes galaxisok. Jelen pillanatban a második elgondolás látszik valószínűbbnek. Az utóbbi években felfedezett szuperhalmazok ugyanis olyan hatalmas szerkezetek, melyek nem jöhettek volna létre véletlenül szétszórt galaxisok összerendeződésével annyi idő alatt, ami a Világegyetem keletkezése óta eltelt.

A galaxisok keletkezésével kapcsolatos legkomolyabb probléma az, hogy megfigyeléseink szerint az ősrobbanás után már 2-3 milliárd évvel léteztek galaxisok és azokon belül csillagok. Ahhoz viszont, hogy az anyag ilyen „gyorsan” csoportokba rendeződjön, valamilyen ősi, kezdeti inhomogenitásnak már nem sokkal az ősrobbanás után is léteznie kellett. Az anyag, miután elvált a sugárzástól, ezeknél a csomóknál kezdett sűrűsödni, és ezeken a helyeken alakultak ki a szuperhalmazok, galaxishalmazok. Az elgondolás problematikája, hogy a Világegyetem kezdeti idejéből ránk maradt kozmikus háttérsugárzás rendkívül egyenletes. Ha léteztek volna ilyen anyagsomók, azoknak a háttérsugárzásban nyomot kellett volna hagyniuk apró egyenetlenségek formájában.

Az ilyen apró sűrűség-ingadozások kimutatása nehéz feladat. 1989 novemberében állították Föld körüli pályára a COBE (Cosmic Background Explorer) űrszondát, melynek feladata a kozmikus háttérsugárzás feltérképezése volt. Az első év eredményeinek feldolgozása után találtak néhány olyan jelet, melyek a keresett hőmérséklet ingadozások létre utaltak. Ezek

mindössze 30 milliomod fokkal tértek el az átlagos hőmérséklettől, így a megfigyelések további megerősítésre szorulnak.

A probléma egyik lehetséges megoldását emellett a láthatatlan tömeg adhatja. Amennyiben a Világegyetem tömegének nagyrészt rendkívül gyengén kölcsönható részecskék alkotják, ezek segítségünkre lehetnek a galaxisok keletkezésénél. Mivel a láthatatlan tömegnek rendkívül gyenge a kölcsönhatása a „normál” anyaggal, már jóval a kozmikus háttérsugárzás kialakulása előtt lecsatolódhatott, elválhatott a „normál” (barionikus) anyagtól - és megkezdhetette különböző formációkba tömörülését. Gyenge kölcsönható képessége révén már a Világegyetem korai időszakában önálló életet tudott élni, csomókba rendeződhetett, és ugyancsak emiatt nem hagyott nyomot a kozmikus háttérsugárzás hőmérséklet-eloszlásában. Mire a Világegyetem annyira lehűlt, hogy az atomok kialakulhattak, a láthatatlan anyag csomói sűrűsödési góccokként szolgálhattak a további anyag-tömörüléseknek.

Az anyag hatalmas fonalak, lapok mentén kezdett sűrűsödni. Eközben természetesen tágult a Világegyetem, így eleinte ezek az anyagsomók is részt vettek az általános tágulásban. Azonban ezt az őket elválasztó ritkább régióknál lassabban tették - gyenge gravitációs terük ugyanis ebben némileg visszatartotta őket. Gravitációs terük révén lassan, fokozatosan egyre több anyagot vonzottak magukhoz, ami egyre inkább lassította tágulásukat. Egyre sűrűbbek lettek környezetüknél és egyre nagyobb lett a tömegük. Végül gravitációs erejük legyőzte a tágulást, és anyaguk elkezdett összehúzódni. A zsugorodás során kisebb felhőkre darabolódtak szét, amelyek szintén tovább aprózódtak. A szuperhalmazok összehúzódásával kialakultak a galaxishalmazok, ezek összehúzódásával a mai galaxisok ősei. A zsugorodás során az egyes anyagsomók esetleges mozgása, forgása felgyorsulhatott, a felhők egymásra kifejtett kölcsönhatása ugyancsak pörgést eredményezhetett. Elképzelhető, hogy az ősi felhők összehúzódása előtt is keletkeztek csillagok, de amíg a sűrűség el nem érte a 10^{-22} g/cm³ körüli értéket, csak kis számban.

Az előbb említett felhők összehúzódása a Világegyetem első évmilliárdja során kezdődhetett meg. Az összehúzódó felhő gázanyaga sugárzás révén energiát veszíthet: atomjai egymással ütközve mozgási energiájuk egy részét sugárzás formájában leadhatják. Ha ez a sugárzás szabadon eltávozhat a felhőből, csökkenhet annak hőmérséklete, ami elősegíti a további zsugorodást. Egy ilyen anyagsomó összehúzódása természetesen a középpontjában a leggyorsabb, így először ott alakul ki anyag-tömörülés, amelyből létrejön a galaxis magja. Amint növekedett az anyagsűrűség, heves csillagkeletkezés indult meg az egész felhőben. Ekkor sok nagytömegű csillag jött létre, melyek szupernóvarobbanások formájában elkezdtek feldúsítani az intersztelláris anyagot nehéz elemekkel. Az ilyen heves csillagkeletkezés egyébként csak az első néhány évmilliárdra jellemző, amint a felhő összehúzódása véget ér, a csillagkeletkezés is alábbhagy.

Elképzelhető, hogy a napjainkban megfigyelhető kvazárok az elsőként kialakult galaxisok magjai. A kvazár kifejezés egy rövidítés, amely quasi stellar radio source-ot jelent, azaz csillagszerű rádióforrást. Az elnevezés onnan származik, hogy az objektumokat a rádióterományban fedezték fel, és pontszerű, azaz csillagszerű megjelenéssel rendelkeznek. Ha vöröseltolódásuk nagy távolságukból adódik, akkor ezek a Világegyetem ma ismert legtávolabbi és legfiatalabb objektumai. Hatalmas távolságuk ellenére azért tudjuk őket megfigyelni, mert óriási energiakibocsátással rendelkeznek. A kvazárokat az ún. Seyfert-galaxisok látszanak összekapcsolni a jelenlegi galaxisokkal, melyek magja egy kvazárra emlékeztet, körülötte azonban csillagokból álló galaxis figyelhető meg.

Az, hogy egy összesűrűsödő anyagfelhőből milyen galaxis jön létre, valószínűleg a kezdeti körülményektől függ. Amennyiben a zsugorodás során lassan keletkeznek csillagok, a

gázanyag önmagával erős kölcsönhatásban tud maradni. Hűlni képes, és mozgását a súrlódás is befolyásolhatja. Azonban ha az anyag elég gyorsan alakul csillagokká, már más a helyzet. A csillagok a galaxisok méretéhez képest kis objektumok, elhanyagolhatóan ritkán ütköznek - azaz a galaxis csillagokká alakult anyaga már nem tud önmagával kölcsönhatni. Az utóbbi esetben feltehetőleg egy elliptikus galaxis keletkezik: a felhőből gyorsan alakulnak ki csillagok, amelyek mozgása kaotikus lesz. A galaxis anyagának nagy része egy korai, rendkívül heves csillagkeletkezési epizód során csillagokba tömörül. Alig marad „alapanyag” a következő csillaggenerációk részére - ezért az elliptikusokban azóta is csak elvétve keletkeznek csillagok. (A megfigyelések arra utalnak, hogy teljes anyaguk nem alakult csillagokká, egy részük kilöködött vagy kívül maradt a galaxison. Itt a későbbiekben sem keletkeztek csillagok, ennek a forró gáznak észleljük röntgensugárzását napjainkban.)

Amennyiben a csillagkeletkezés lassú a protogalaxis összehúzódásához képest, a gázanyag kölcsön tud hatni önmagával, és az ütközések révén energiát veszíthet. A perdülettel rendelkező felhő forgása az összehúzódás során felgyorsul. A forgássíkban lévő anyag egyre nagyobb sebességgel fog keringeni, és egy idő után nagy keringési sebessége folytán megáll az összehúzódása. A folyamat eredményeként a forgássíkban egy stabil anyagkorong alakul ki. Itt ezután nem növekszik tovább az anyagsűrűség, nem lesz olyan heves a csillagkeletkezés, és így jelentős gázanyag marad hátra a további csillaggenerációk számára. Valószínűleg ilyen folyamatok eredményeképpen alakultak ki a spirális és lentikuláris galaxisok. A pörgés létrejöhet az összehúzódás apróbb szabálytalanságai révén, illetve kiválthatja az ősi gázfelhők egymás közötti kölcsönhatása is. A szabálytalan galaxisok valószínűleg a galaxiskeletkezés melléktermékei, „selejtjei”.

Jelenlegi megfigyeléseink szerint a legtávolabbi és ezért legkorábbi galaxisoknál elég gyakori a kék szín. Ez sok nagytömegű, rövid életű csillag létre utal - ez pedig heves csillagkeletkezésre. A képek tanúsága szerint a csillagkeletkezésben fontos szerepe van a galaxisok közötti ütközéseknek, kölcsönhatásoknak, akkoriban ugyanis a galaxisok nagy része kölcsönható rendszer volt. A felvételek még egy érdekes jelenségre rámutattak: régebben a galaxisok között kb. kétszer annyi volt a spirális szerkezetű, mint napjainkban. Fel kell tételeznünk tehát, hogy mára valamilyen folyamat révén csökkent mennyiségük. Erre több lehetőség is adódik: elképzelhető, hogy egyes spirálisok öregedésükkel párhuzamosan fokozatosan elhalványodtak, és nagyrészüket észrevehetetlenné vált. Ugyanakkor az is lehetséges, hogy a heves kölcsönhatások során egy részük összeolvadt, és elliptikus galaxisokat alkotott. Erre utal egyébként néhány elliptikus galaxis körül megfigyelhető többszörös koncentrikus héj, melyek anyaga az ütközések során löködhetett ki.

A Tejútrendszer keletkezése

Tejútrendszerünk életkorát nehéz megállapítani, jelenlegi becsléseink arra utalnak, hogy 10-16 milliárd éves lehet (az utóbbi érték a valószínűbb). Őse egy közel gömb alakú felhő volt, az elsőként keletkezett csillagok ezt az ősi, közel gömb formát őrizték meg - ezek a halo csillagai. Az anyag összehúzódása nem lehetett teljesen homogén, zsugorodása során valószínűleg nagyobb anyagcsomók is keletkeztek benne, ezekből alakulhattak ki a gömbhalmazok. Azok a kisebb anyagcsomók pedig, amelyek az ősi felhők külső területén jöttek létre, elszakadhattak galaxisunktól, és törpe galaxisok formájában önállóan élhettek tovább. Így alakulhatott ki néhány a Tejútrendszerünk jelenlegi kísérői közül. Gömbhalmazok egyébként nemcsak a protogalaxis összehúzódó anyagából jöhetnek létre, hanem a galaxisközi térből behulló és összenyomódó felhőkből is. Erre utalnak például a retrográd, azaz a Tejútrendszer általános forgási irányával ellentétes irányba keringő gömbhalmazok. Az összehúzódás során termé-

szetesen a középpontban, a későbbi magban lett a legnagyobb az anyagsűrűség, itt rendkívül sok csillag keletkezett. Elsőként tehát a mag és a halo objektumai alakultak ki, ezeket szokták a II. populációba sorolni. A Tejútrendszer életének korai szakaszában heves volt a csillagkeletkezés, a sok nagytömegű csillag szupernóvarobbanása feldúsította a csillagközi anyagot nehezebb elemekkel. A fémtartalom növekedése rendkívül gyors volt, 100-1000-szeresére nőtt az első 1-2 milliárd év alatt, ami a halo csillagainak és a korong első csillagainak kialakulása között eltelt. A korong létrejötte után a fémtartalom már sokkal mérsékeltebben, lassabb ütemben növekedett és növekszik még ma is. A halo anyagban elszegényedett, így ott ma már nem keletkeznek csillagok, ezzel ellentétben a fősík napjainkban is heves csillagkeletkezés színhelye. Az itt lévő égitesteket I. populációs objektumoknak nevezzük.

A csillagok keletkezése

A csillagok a galaxisokban, az ott található csillagközi anyag összesűrűsödésével keletkeznek - ezt a folyamatot a Tejútrendszerben is megfigyelhetjük. Az intersztelláris anyag nem egyenletesen tölti ki a teret a galaxisokban, hanem sűrűbb felhőket és azokat elválasztó ritkább régiókat alkot. Egy ilyen felhő állapotát elsősorban két tényező határozza meg. Saját tömegéből adódó gravitációs tere, amely összehúzni, összenyomni próbálja, és a belsejében lévő gázanyag hőmozgása révén kifejtett gáznyomás, ami pedig megpróbálja szétnyomni. Amennyiben a két erő kiegyenlíti egymást, a felhő stabil egyensúlyi állapotban van.

Ahhoz, hogy a felhőből csillag keletkezzen, el kell kezdenie az összehúzódást - azaz a gravitációs erőnek le kell győznie a gáznyomást. Minél magasabb a gáz hőmérséklete, részecskéinek hőmozgása, annál jobban ellen tud állni a gravitáció összehúzó erejének. Éppen ezért minden adott hőmérséklethez tartozik egy kritikus tömeg illetve sűrűségérték, amelyet ha a felhő meghalad, megkezdődik az összehúzódás. Az előbbiekből következik, hogy a magasabb hőmérsékletű felhők összehúzódásához nagyobb tömeg kell, ezért a nagytömegű (O, B) csillagok melegebb anyagból keletkeznek. A hidegebb felhők összehúzódásához és kisebb csillagok kialakításához viszont kisebb tömeg is elegendő.

A csillagközi felhők úgymond „maguktól” ritkán érik el ezt a kritikus tömeget illetve sűrűséget, így valamilyen külső folyamatnak össze kell nyomnia őket addig a határig, ahonnan kezdve már önállóan is folytathatják a zsugorodást. Ilyen hatást többféle jelenség is kiválthat, pl. szupernóvarobbanások lökéshullámai, nagytömegű csillagok sugárzása, egymással ütköző és az ütközés hatására összenyomódó felhők. Jelenlegi megfigyeléseink szerint két fontos tényező kapcsán válik intenzívvé a csillagkeletkezés: ezek egyike a galaxisok spirálkarjai. Tejútrendszerünkben a spirálkarok olyan sűrűség hullámoknak, gravitációs potenciálgödröknek tekinthetők, melyekben az áthaladó csillagközi anyag sűrűsége mintegy 10%-kal megnő. Amint egy felhő belép egy spirálkarba kissé lefékeződik, lökéshullámok keletkeznek benne, anyaga összebb nyomódik. Megfigyeléseink szerint a fiatal csillagok (amelyek még nem vándorolhattak messzire keletkezési helyüktől) a spirálkarokban találhatók. Itt sem egyenletesen töltik ki a teret, hanem csoportokat alkotnak.

Ez a csoportosulás a csillagközi anyag jellegéből adódik. Az intersztelláris anyag háromféle állapotban lehet: ionizált (ezek a II területek), atomos (HI területek), és molekuláris (molekulafelhők). A II és HI területek hőmérséklete túlságosan magas ahhoz, hogy könnyen össze lehessen nyomni őket. Így a csillagkeletkezés színhelyeként elsősorban a molekulafelhők maradnak, amit megfigyeléseink meg is erősítenek. Ezek nagytömegű, nagysűrűségű és hideg felhők. Az óriás molekulafelhők tömege több százezer naptömeg is lehet, sűrűségük 100-300 molekula/cm³, hőmérsékletük 10-90 K körüli; bonyolult belső szerkezettel rendelkeznek. Ezek a molekulafelhők a spirálkarokba belépve válhatnak a csillagkeletkezés intenzív helyszínévé.

A molekulafelhők külső peremén általában nagytömegű csillagokból álló fiatal asszociációk találhatók, belsejükben pedig sok olyan hőszugárzó anyagsomó, amelyek kialakulóban lévő vagy már kialakult kisebb tömegű csillagok lehetnek. Más-más folyamat hozhat létre a felhők szélén nagytömegű, és a felhők belsejében pedig kistömegű csillagokat. A molekulafelhők külső részén valamilyen külső hatásra indulhat meg a csillagkeletkezés. Az itt kialakult nagytömegű csillagok ionizálják a környezetükben lévő anyagot, a kifelé haladó ionizációs frontok pedig összenyomják a molekulafelhőnek a csillagokkal szomszédos régióját. Itt ennek következtében ismét születik egy asszociáció, ami hasonló módon újabb csillagkeletkezést vált ki - így a csillagkeletkezés „futótűzként” terjed tovább. A molekulafelhők belsejében lévő csillagok más úton, valószínűleg kisebb felhők ütközésével keletkeznek.

A felhő saját gravitációs tere hatására akkor kezd összehúzódni, amikor a gravitációs erő felülkerekedik a gáznyomáson. A gravitációs összehúzódás megkezdéséhez a különböző hőmérsékletű felhőknek különböző tömeg kell - ez a tömeg azonban minden esetben nagyobb 100 naptömegnél. Egy ilyen nagytömegű anyagsomó az összehúzódás során több kisebb felhőre esik szét, amelyek a további zsugorodás során szintén aprózódhatnak. Ez a folyamat ad magyarázatot a csillagok egy helyen és egy időben történő keletkezésére, azaz a nyílthalmazok és asszociációk kialakulására. Valószínűleg ilyen darabolódás során, illetve ionizációs frontok összenyomása révén keletkeznek a kis molekulafelhők, a globulák, melyek szintén a csillagkeletkezés színhelyei. Ezek átlagosan 1-4 fényév átmérőjű, sűrű, hideg (10-20 K hőmérsékletű), zsugorodásban lévő felhők. Tömegük 20-200 naptömeg közötti, néhány százezer év alatt protocsillaggá alakulnak.

Miközben a felhő összehúzódik, hőmérséklete eleinte még nő számottevően. A benne lévő gázatomok, molekulák egymásnak ütköznek, és az ütközések alkalmával mozgási energiájuk egy része kisugárzódik. Amíg erre a sugárzásra nézve a felhő anyaga átlátszó, az szabadon eltávozik, és nem melegíti az anyagsomót. A felhő összehúzódása egyébként nem homogén: a középpont sűrűsége ugyanis gyorsabban nő, mint az azt körülvevő részeké. A sűrűsödő centrum egy idő után már nem lesz átlátszó saját sugárzására nézve, és melegedni kezd - innen az anyagsomót már protocsillagnak nevezzük. (A protocsillag definíció szerint olyan anyagsomó, amely összehúzódása révén termel energiát, és a továbbiakban már nem darabolódik.) A centrum gáznyomása a hőmérséklet emelkedésével folyamatosan nő, és egy idő után megállítja a további zsugorodást. Ekkor egy stabil mag jön létre. Közben erre a hidrosztatikus magra folyamatosan hull anyag az őt körülvevő kiterjedt burokból, és lassanként tovább növeli tömegét, hőmérsékletét. Egy idő után a hőmérséklet elég magas lesz, hogy a molekulákat atomokra, ionokra szét tudja választani, disszociálni. Innen kezdve az anyagsomó hője a molekulák szétbontására fordítódik, és ismét zsugorodhat további melegedés nélkül. Ezt nevezzük a szabadesés fázisának, tartama néhány száz év. Amikor a hőmérséklet ismét túl magasra szökik, a rohamos zsugorodás lelassul, egy új és kisebb mag alakul ki az előbbi középpontjában. (A szabadesés szakasza alatt a Nap a Plútó pályájának távolságából a Merkúr pályájának méretéig húzódott össze.) Időközben a külső réteg anyaga tovább hullik erre a magra, melynek felszínével ütközve felmelegszik.

Az összehúzódó felhő anyagának csak közel 10%-a épül be a későbbi csillagba, a többi a protocsillag erős sugárzása révén eltávozik. (A Nap pl. közel 20 naptömegű felhőből keletkezett.) Az anyagnak az a része, amely jelentős impulzusmomentummal, lendülettel rendelkezik, a bezuhanás során egyre gyorsabban fog a centrum körül keringeni. Mozgása végül annyira felgyorsul, hogy nem is tud a protocsillag felszínére hullani, hanem akörül fog mozogni. A folyamat révén egy korong alakul ki - ez alapul szolgálhat a bolygórendszer keletkezéséhez.

A protocsillag összehúzódása a szabadesés fázisa után jelentősen lelassul. A zsugorodás hatékonyabb energiatermelő folyamat, mint a magfúzió, ekkor energiakibocsátása jelentősen meghaladja későbbi, fősorozati energiakibocsátását. Fénye azonban nem távozik el szabadon, az őt körülvevő por- és gázburok következtében erősen elvörösödik. A szabadesés szakasza után nagyságrendileg néhány millió évvel kerül a fősorozatra. (Ez erősen függ a tömegtől. A 3-5 naptömegnél nagyobb tömegű csillagok magjában a hidrogén fúziója már akkor beindulhat, amikor még a csillagok javában anyagot gyűjtenek környezetükből.) A protocsillagnak abban a fejlődési szakaszában, amikor sűrű anyagkoronggal rendelkezik, gyakran lehet megfigyelni a csillag forgástengelyének két pólusából kifelé irányuló, ún. bipoláris anyagkilövelléseket. Ez a protocsillag erős anyagkibocsátásának következménye lehet, amely a vastag korong miatt csak a két pólus irányába talál magának szabad utat. (A jelenségben valószínűleg elektromágneses hatások is közre játszanak.) A bipoláris anyagkilövellés során távozó tömeg elérheti a protocsillag tömegét is. (A közvetlenül kilövellt anyag tömege ennél jóval kisebb - az kifelé haladva, a burokból ragad magával sok anyagot.) A protocsillag nagy energiakibocsátása lassanként elpárologtatja az őt körülvevő felhő porszeméit és annak gázanyagát is elkezd kisöpörni - kivéve az addigra összeállt nagyobb testeket, bolygócsírákat. Ezt a szakaszt nevezzük T Tauri stádiumnak. Ennek során jelentős a protocsillag tömegvesztése, az anyagkibocsátás a felszínről erős csillagszél formájában az évi 10^{-7} naptömeget is elérheti.

A kialakuló csillagnak rendkívül gyorsan kellene pörögnie, amennyiben ősi felhőjének teljes impulzusmomentumát megőrizte volna. Ennek azonban jelentős részét elvesztette, valószínűleg az alábbi két folyamat révén. Összehúzódása korai szakaszában erővonalak segítségével a környezetébe vezette el lendülete egy részét (valamint elképzelhető, hogy a korongba), később pedig erős csillagszél segítségével szabadult meg tőle. Ugyancsak impulzust veszíthet a túlságosan gyorsan pörgő protocsillag, ha két vagy több részre válik szét, ekkor forgási energiájának egy része keringési energiává alakul. (Ez magyarázatot ad a szoros kettős és többszörös rendszerek keletkezésére.) Amikor a zsugorodó protocsillag belsejében a hőmérséklet eléri a néhány millió fokot, egy-két könnyebb elem (Li, Be, B) fúziója megindul, ez azonban még nem tudja megállítani az összehúzódást. A zsugorodás egészen addig folytatódik, míg meg nem kezdődik a centrumban a hidrogénfúzió, és míg olyan intenzív nem lesz, hogy képes legyen egyensúlyba hozni a csillagot. A Tejútrendszerben napjainkban is folyik a csillagkeletkezés, átlagosan 1-100 évenként jöhet létre egy új csillag.

Az elemek keletkezése

Mint azt oldalon kifejtettük, az Univerzum hőmérséklete tágulásával párhuzamosan csökkent, és ennek során egyre bonyolultabb szerkezetek felépülésére nyílt lehetőség. A kezdő pillanatot követő harmadik perc utáni rövid időszakot nevezzük az ősi nukleonszintézis korszakának. Ekkor az egész Világegyetem egyetlen hatalmas csillagként működött: hidrogén atommagokból hélium atommagokat hozott létre.

A folyamat első lépéseként egy protonból és egy neutronból álló deutériummagnak kell keletkeznie. A deutériummag azonban magas hőmérsékleten könnyen bomlik, így amíg az Univerzum hőmérséklete egymilliárd K alá nem csökkent, nem indulhattak meg a fúziós reakciók. A köztes lépcsőfokot képviselő deutériummagok nem voltak stabilak. (A hélium atommagok már korábban is stabilak lehettek volna, de deutérium hiányában nem keletkeztek.) Amint e kritikus hőmérséklet alá jutunk, robbanásszerűen heves fúzió indul meg. A szabad neutronok mind atommagokba épülnek be, és a „normál” (barionikus) anyagnak közel 25%-a héliummá alakul. A négyes tömegszámú héliumnál nehezebb magok nem jöttek létre, mivel ötös tömegszámú stabil mag nem létezik, a hőmérséklet pedig már túl alacsony

bonyolultabb fúziós reakciókhoz. Hélium és trícium magok ütközésekor még egy kevés Li is keletkezett - de a nehezebb elemekre a csillagok megszületéséig várnunk kell.

Van még három elem, melyek mind keletkezésük módját, mind pedig előfordulási arányukat tekintve eltérnek társaiktól. Ezek a Li, Be és B, egyikük sem bírja a csillagok belsejében uralkodó magas hőmérsékletet, így ott elbomlanak. Éppen ezért mennyiségüket nemhogy növelik, épp ellenkezőleg: csökkentik a csillagok. A három kérdéses elem a csillagközi térben keletkezik, egyszerű atommagokból, nagyenergiájú kozmikus sugarak (pl. protonok, hélium atommagok) bombázásának hatására.

A fentiekből következik, hogy a legelső égitestek életük elején még nem rendelkezhetek nehéz elemekkel, azaz akkoriban még nem lehettek Föld-típusú bolygók és hozzájuk hasonló élőlények. (A Tejútrendszerben található legidősebb csillagok tömegének mindössze 0,002%-a áll nehéz elemekből, míg ez az arány a Napnál 2% körüli.) A nehezebb elemek (csillagászati kifejezéssel a hidrogénnél és héliumnál nehezebb elemeket fémeknek nevezzük) a csillagok belsejében jöttek létre. Elsőként héliummagok épülnek fel hidrogénmagokból, mint azt a „Csillagok élete” című fejezetben már megismertük. Miután a csillag magjában a hidrogén elfogy, összehúzódik, melegedni kezd, és egy idő után olyan forró lesz, hogy megkezdődnek benne a hélium atommagok fúziói. Ennek során szén atommagok jönnek létre, melyek egy újabb hélium atommag elnyelésével oxigén atommagokká válhatnak, illetve kisebb arányban egyéb elemek is keletkezhetnek. (Fúziós reakciók egyébként nemcsak a csillagokban játszódhatnak le, hanem például szoros kettős rendszerekben a csillagközi térben is. Amennyiben az egyik égitest kitölti Roche-térfogatát, ezen a határon kívül kerülő anyaga a társra hullik egy ún. akkréciós korongon keresztül. Ebben a korongban a gáz egyre gyorsabb ütemben spirálozik befelé, miközben annyira felforrósodik, hogy fúziós reakciók játszódhatnak le benne.)

A szénnél nehezebb elemek többféle módon is létrejöhetnek a nagytömegű csillagok belsejében. Ezeknél a csillagoknál a helyzetet az is bonyolítja, hogy az ott uralkodó magas hőmérsékleten sok nagyenergiájú foton is keletkezik. Ezek szét tudnak bontani atommagokat - az így létrejött töredékek pedig ismét fuzionálhatnak különféle magokkal. A fúziós reakciók mellett a neutronbefogásos folyamatok is fontos szerepet játszanak, melyek keretében egy adott atommaghoz egy vagy több neutron kapcsolódik. A neutronbefogásnak két fajtáját érdemes megemlíteni: az S és az R folyamatot. Az S slow, azaz lassú neutronbefogást jelent, melynek során kevés szabad neutron áll rendelkezésre. Így két neutron befogása között relatíve hosszú idő telik el, miközben a kérdéses mag elbomolhat. Az R rapid, azaz gyors folyamatot jelöl, ekkor nagy a neutronfluxus, akár 100 neutronbefogás is történhet néhány másodperc alatt. Olyan gyors egymásutánban érkeznek a neutronok a magokba, hogy azoknak egy-egy instabil állapotnál gyakran nincs is idejük elbomlani - így jöhetnek létre a legnehezebb elemek. R folyamatok csak szupernóvarobbanások rendkívüli energiaszabadulásai során történhetnek.

A csillagok tehát létrehozzák a hidrogénnél és héliumnál nehezebb elemeket, és szupernóvarobbanások keretében, csillagszelek segítségével teleszórják azzal az intersztelláris teret. A csillagközi tér nehéz elem tartalma tehát folyamatosan növekszik. A jelek szerint Tejútrendszerünk első 1-2 évmilliárdja során rendkívül sok szupernóvarobbanás történt, és gyorsan növekedett a nehézelem-tartalom. Ezután a növekedés alábbhagyott, és azóta csak lassan, kismennyiségben jutnak nehéz elemek a világűrbe.

A Naprendszer keletkezése

A Naprendszer keletkezését taglaló elméleteknek az alábbi fontos tényekre kell magyarázatot adniuk:

A Naprendszer égitestjeinek nagy része közel egy síkban, mégpedig a Nap tengelyforgásával megegyező irányban kering központi csillagunk körül.

A Naprendszer tömegének legnagyobb része a Napban, impulzusmomentumának legnagyobb része pedig a körülötte keringő bolygókban összpontosul.

A belső és külső bolygók összetételében jelentős különbség mutatkozik.

A nagybolygók körüli holdrendszerek „mini Naprendszerekre” hasonlítanak, azaz hasonló folyamatok révén alakulhattak ki, mint a nagybolygók a Nap körül.

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

A korongban megnövekedett az anyagsűrűség és az apró, mikroszkopikus szemcsék a lágyabb ütközések során összetapadtak, egyre nagyobb testeket építettek fel. Így jött létre az ún. bolygócsírák első nemzedéke, melyek milliméteres, centiméteres testekből álltak. (Az ütközések „lággyá” tételében fontos szerepet játszott a korongban lévő nagymennyiségű atomos, molekuláris gáz.) A bolygócsírák az ütközések során a továbbiakban is egyre nagyobb testekké álltak össze, és egy idő után már sokmilliárd aszteroida méretű bolygócsíra keringett az ősnap körül. Minden ilyen test életében gyökeres változás áll be, amikor átmérője eléri a néhány száz km-t. Innen kezdve gravitációs tere már jelentőssé válik, és tömegvonzása segítségével olyan szemcséket is magába tud építeni, amelyekkel egyébként nem ütközött volna össze - növekedése tehát felgyorsul.

Fontos szerepet játszik a bolygócsírák összetételének kialakításában a protocsillag erős sugárzása. Ennek a sugárzásnak a következtében a korongban a centrumtól kifelé haladva fokozatosan csökken a hőmérséklet. Mivel a protocsillaghoz közel magasabb hőmérséklet uralkodott, ezért ott csak a kevésbé illékony, azaz magas olvadáspontú anyagok tudtak kicondenzálódni (fémek, szilikátok, egyes oxidok stb.). Ezzel ellentétben az ősköd külső régiójában, alacsonyabb hőmérsékleten sok illékony anyag (víz, különféle gázok) is kicsapódhattak, kifagyhattak. A folyamat következtében létrejött elemeloszlás a későbbi égitestek összetételében is megmutatkozik. A belső területeken főként kőzetekből álló objektumok jönnek létre (Föld-típusú bolygók, kisbolygók), a külső részeken pedig könnyű anyagokból álló égitestek (óriásbolygók, üstökösök).

A protocsillagot övező anyagkorongban egyre nagyobb bolygócsírák jöttek létre, de nagymennyiségű anyag keringett szabadon gáz és porszemek formájában is. (A korong teljes tömege nagyságrendileg az egy naptömeg tartományába esett. Eredeti összetétele megegyezett a Nap összetételével, azaz a hidrogénnél és héliumnál nehezebb elemek csak kb. 2%-át alkották.) Ennek a szabadon maradt anyagnak és a kis porszemeknek az eltávolításáról a T Tauri stádiumba kerülő központi égitest gondoskodik. Fejlődésének ezen a szakaszán rend-

kívüli mértékben felerősödik csillagszele, és kisöpri a bolygócsírákba be nem épült anyagokat környezetéből.

Az egyre nagyobbra növekvő bolygócsírák közül a nyolc legnagyobb kialakította a négy belső és a négy külső bolygót. A négy külső bolygó meglehetősen nagy tömeggel bírt, így összeállásuk során nem csak magukba építettek sok anyagot, hanem jelentős mennyiséget állítottak önmaguk körüli pályára is. Ez az anyag a bolygók egyenlítői síkjában kezdett felhalmozódni, és a későbbiekben belőle alakultak ki a holdak. A megmaradt apróbb törmelékszemcsék lassan a bolygók felé zuhantak, és átmenetileg gyűrűk formájában léteztek. (Mivel a gyűrűk anyagutánpótlása többé-kevésbé folyamatos, ezért ma is gyűrűrendszereket találhatunk a négy nagybolygó körül.) A Jupiter és a Szaturnusz őse olyan nagytömegű volt, hogy a legillékonyabb anyagokból, a hidrogénből és a héliumból többet tudott megtartani, mint külső két társa, az Uránusz és a Neptunusz. A bolygócsírák tehát létrehozták a négy belső bolygót és a négy külső bolygót. Az összeállás persze nem volt tökéletes, így sok apró törmelékanyag maradt meg. Ezek közül a belső területen elhelyezkedőket nevezzük kisbolygóknak, a külső régiókban találhatóakat pedig üstökösöknek. A Mars és a Jupiter közötti térségben is megkezdődött a bolygócsírák összeállása nagybolygóvá, de azt a közeli nagytömegű Jupiter gravitációs zavaró hatása megakadályozta. Az ott lévő bolygócsírák az erős ütközések során felaprózódtak, egy részük kilöködött a régióból - a maradék alkotja ma a kisbolygóövet. A Naprendszer külső részében, a Neptunuszon túl valószínűleg nem jött létre nagybolygó. A bolygócsírák növekedése itt alapanyag hiányában egy idő után megállt, az így kialakult apró égitestek alkotják a Kuiper-övet. (Ezek egyik nagy képviselője a Plútó.) Az óriásbolygók között keringő bolygócsírák (üstökösök) közül azok, amelyek nem épültek be egyik nagybolygó anyagába sem, egy-egy közeli elhaladás alkalmával messzire kilöködtek. Ezek a kidobott kis jeges égitestek egy hatalmas felhő formájában veszik körül a Naprendszert, ez az Oort-féle üstökösfelhő. (Az itt lévő égitestek együttes tömege jelentős lehet, elképzelhető, hogy eléri az Uránusz vagy Neptunusz tömegét.) Egy részük akkora sebességgel löködött ki az óriásbolygók övezetéből, hogy örökre elhagyta Napunk környezetét - ezek csillagközi üstökösök formájában vándorolnak a Tejútrendszerben.

A bolygók összeállása után visszamaradt bolygócsírákra hosszútávon kétféle sors várt. Vagy kilökték őket a nagybolygók egy-egy közeli elhaladás alkalmával, mint azt fent említettük, vagy előbb-utóbb összeütköztek valamelyikkel, és annak részévé váltak. A bolygóközi térben lévő anyagdarabok száma így fokozatosan csökkent és velük együtt a meteorbombázás ereje is alábbhagyott. (Az ősi Naprendszer meglehetősen vad hely lehetett, gyakoriak voltak a gigantikus méretű becsapódások. Az ilyenek során felszabadult hő valószínűleg fontos szerepet játszott az égitestek belső differenciálódásának megindításában.) A bombázás mértékének időbeli változása meghatározható, és ennek segítségével az égitestek felszínének kora is: minél több kráter borít egy objektumot, annál idősebb a kérdéses terület. A kráterezettség feltérképezésével tehát egy bolygó felszínének fejlődéséről szerezhetünk információkat. A bolygóközi térben persze a kisbolygók folytonos ütközése és az üstökösök porladása során állandóan keletkezik törmelékanyag, amelynek becsapódásai ugyancsak krátereket hozhatnak létre. Ezek mennyisége azonban nagyságrendekkel kisebb a Naprendszer kezdeti évmillióiban uralkodó bombázásénál. A nagybolygók összeállása és a Nap fősorozatra fejlődése 4,6 milliárd évvel ezelőtt fejeződött be. Nagyszámú égitest keletkezett, nem is kell csodálkozni, hogy egyikük felszínén pont olyan körülmények uralkodtak, amelyek megnyitották a kaput az anyag további fejlődése előtt.

A Világegyetem jövője

A Világegyetem jövője a benne található anyag tömegétől, azaz az egész Univerzum sűrűségétől függ. Ez határozza meg a Világegyetem geometriáját, melyben három esetet különböztetünk meg: a nyílt (hiperbolikus), a sík, illetve a zárt (gömbi) Világegyetemet. Amennyiben az Univerzum tömege egy bizonyos határ alatt van, azaz nyílt, örökké tágulni fog. Ha tömege pontosan ezzel a határértékkel egyezik meg (sík Világegyetem), a tágulás folyamatosan lassulva a nullához tart, amit a végtelenben ér el. Amennyiben tömege meghaladja ezt a kritikus határt (azaz zárt), akkor a benne lévő anyag gravitációs ereje elég nagy ahhoz, hogy egy idő után megállítsa a tágulást, amit összehúzódás követ majd, végén a Nagy Bumm ellentétével: a Nagy Reccsel. A Világegyetemben lévő látható anyag a kritikus tömegnek csak közel 1%-át teszi ki, a láthatatlan tömeggel együtt azonban pont a kritikus határon mozgunk.

Amennyiben nyílt Világegyetemben élünk, a tágulás az idő előrehaladtával csak kismértékben fog lassulni. Egyre távolabb kerülnek majd egymástól a szuperhalmazok és a galaxishalmazok, csak a galaxishalmazok tagjai és az azokon belüli égitestek maradnak együtt. A távolodó galaxisok egyre halványabb és egyre kisebb foltok formájában látszanak majd az égen. A csillagközi anyag szinte teljesen csillagokká alakul, és elfogyta után már nem születnek újabb csillagok. Amint ezek felélik üzemanyagukat, előbb a nagyobbak, majd a kisebb tömegűek sorra elhalványodnak. Végül a legkisebb, leghalványabb és leghosszabb életűek is elhasználják tüzelőanyagukat, és a galaxisok sötétén kavargó halott fekete törpékből, neutroncsillagokból és fekete lyukakból fognak állni. Az égbolt ekkor lassanként kihál: se a Tejútrendszerben, se más galaxisokban nem fognak csillagok ragyogni. A galaxisokban a halott csillagok egy része az egymáshoz közeli elhaladások alkalmával kilöködik, más részük pedig a galaxisok magja felé hullik. Így az idő előrehaladtával a galaxisok anyagának egy része széteszik, és kidobott sötét objektumok fognak kavarni a világűrben. Maradékuk a galaxisok centrumába hullik, és az ott lévő fekete lyukak tömegét fogják növelni. A későbbiekben a részecskefizika különleges szerephez jut: a Nagy Egyesítés Elmélete szerint a protonok nem stabil részecskék, hanem 10^{30} - 10^{32} év alatt elbomlanak. (Ezt kísérletileg egyelőre nem sikerült sem igazolni, sem megcáfolni.) A protonok bomlása a távoli jövőben rendkívül kismértékben felmelegíti majd az anyagot. Az egyes égitestek ütközése során is felszabadulhat némi energia, ilyen eseményekre azonban csak ritkán kerülhet sor. Emellett további energiaforrásként szolgálhat a fekete lyukak párolgása, melyek életük végén egy robbanás keretében semmisülnek meg. (A galaxismagokban lévő nagytömegű fekete lyukak elpárologásához nagyságrendileg 10^{10} év szükséges.) Ezen apró események ellenére a Világegyetem hideg, halott és sötét lesz, az égbolt pedig tökéletesen üres. Hasonló következményekkel és jelenségekkel számolhatunk egy sík Világegyetem esetében.

Amennyiben a Világegyetem zárt, tömege elegendő a tágulás megállításához, majd visszafordításához. A rendelkezésünkre álló idő azonban ebben az esetben is bőségesen elegendő ahhoz, hogy a tágulás megállásáig a csillagok az előbb leírtaknak megfelelően kihunyjanak. Az összehúzódás megindulását követően azonban érdekes eseményeket lehet megfigyelni. A háttérsugárzás fotonjainak energiája lassanként növekedni kezd, a gravitációs vonzás miatt pedig a Világegyetem az idő előrehaladtával egyre gyorsabb ütemben zuhan végzete felé. Amikor már csak 1-2 milliárd éve van hátra az Univerzumnak, a szuperhalmazok, galaxishalmazok egymásba kezdenek olvadni. A növekvő energiájú háttérsugárzás miatt a világűr, az „égi háttér” egyre forróbb és világosabb lesz. Eközben az egyes galaxisok anyaga is összekeveredik, és egyre gyakrabban ütköznek egymással a különböző égitestek. Amikor már csak közel 100 ezer év lesz hátra, az ég kb. olyan fényessé válik, mint a Nap felszíne. A csillagok ekkor felmelegszenek, maradék nukleáris tüzelőanyaguk begyullad, majd a növekvő forróság miatt sokuk felrobban - fergeteges tűzijáték játszódik le az egész Világegyetemben. Ekkor a

fekeke lyukak is nagy lakomát űnek. Egyre több anyagot kebeleznék be környezetűkből, végűl pedig egymás befalására fanyalodnak, majd egy utolsó kozmikus keringő formájában vadul összeolvadnak. Az eredmény egy óriási fekeke lyuk, amely az egész Világegyetemet tartalmazza - egy fekeke lyuk egy fekeke lyukon belül. Mindezek után talán egy új Világegyetem születik, amely előről kezd a nagy kozmikus körforgást. Egy biztos: jókor születünk - születni ugyanis csak jókor lehet.

Módszertani segédletek

A Világegyetem arányai

Az alábbiakban néhány egyszerű, az osztályterem belül, hétköznapi tárgyak segítségével bemutatható modellt fogunk ismertetni, amelyek segítenek a kozmikus méretek, arányok elsajátításában. Ezek mindegyike természetesen csak egy-egy példa, a megadott arányok betartásával bármilyen modellt bátran alkalmazhatunk.

A mikrokozmosz és az atomok arányai

A csillagászati tananyagban nem térünk ki részecskefizikai ismeretek taglalására - az atomok felépítésével ugyanis a diákok a nyolcadikos kémia tantárgy keretében ismerkednek meg. Amennyiben teljesebbé kívánjuk tenni a Világegyetem arányait érintő témakört, érdemes kis léptéktől, az atomok világából kezdeni azt. Az atom két fő részre bontható: a pozitív töltésű atommagra - itt találhatók a protonok és a neutronok - valamint az ezt övező negatív elektronokból álló kiterjedt elektronburokra. Amennyiben az egész atom méretének 10^{-9} cm körüli értéket veszünk, akkor az atommag mérete nagyságrendileg 10^{-13} cm. Tehát az atommag: atom arány 10000 : 1. Azaz, amennyiben az atommagnak egy 1 mm körüli átmérőjű gombostűfejet veszünk, akkor az atom átmérője 10 m körülnek adódik, közel akkorának, mint egy osztályterem. A méretarányokkal ellentétben az atom tömegének közel 99,9%-a az atommagban koncentrálódik.

A Föld-Hold rendszer arányai

A Földünk felszínén lévő formációk méretarányaival a diákok a földrajz tananyag keretében bőségesen megismerkednek. Ezekután következhet a rendszer bővítése égi kísérőnkkel, a Holddal. Két olyan gömbre lesz szükségünk, amelyek átmérőjének aránya 1 : 0,27 - az őket elválasztó távolság pedig 29,3 egység körüli. A Föld szemléltetésére természetesen azonnal egy földgömb adódik. Amennyiben 15 cm körüli átmérőjű földgömböt választunk, akkor a Hold egy 4 cm-es pingponglabdával szemléltethető, amely 4,4 m távolságban kerül meg a földgömböt 27,3 naponként. Ha a 30 cm körüli földgömbbel dolgozunk, akkor a teniszlabda méretű (8 cm-es) Hold 8,8 m távolságban kering körülötte. (Mindegy mekkora gömbbel dolgozunk, a lényeg, hogy belül maradjunk a terem méretein.)

A Nap-Föld rendszer arányai

Amennyiben bolygónkat egy kb. 1 mm-es (lehetőleg kék színű) gombostű fejével szemléltetjük, akkor a Nap átmérőjére 11 cm adódik. Ebben az esetben a gombostű 11,8 méter távolságban kering a 11 cm-es labda körül, egy év alatt megtéve egy teljes fordulatot. Itt már kissé szűkösnek mutatkozhat az osztályterem. Ebben az esetben válasszunk más mértéket, hiszen minden modell egyenértékű, amennyiben betartjuk arányait. Esetünkben a Nap : Föld mérete 110 : 1, a távolság pedig 11790 egység.

A Nap és a csillagok aránya

A különböző tömegű főszorozati csillagok mérete eltérő. A csillagok átmérőjében mutatkozó legnagyobb különbségek azonban az egyes fejlődési állapotokkal függenek össze. A vörös óriás fázisban a csillag átmérője közel százszorosára nő a főszorozati értéknek, vörös óriás : főszorozati csillag 100 : 1. A csillagfejlődés egyik végállapota a fehér törpe stádium, ekkor a főszorozati értéknek a századára csökken az átmérő, főszorozati csillag : fehér törpe 100 : 1. A

nagy tömegű csillagok élete végén kialakuló neutroncsillag sokszorta kisebb a korábban említett égitesteknél, fehér törpe:neutroncsillag 1000:1. Itt már olyan nagy mérettartománnyal van dolgunk, hogy azt az osztályteremben nem tudjuk szemléltetni. Amennyiben a vörös óriás állapot során az átmérőt 100 km-re kicsinyítjük le (azaz akkorára, mint a Balaton hossza), a főszorozati méret 1 km-es lesz (közel akkora, mint egy kerület átmérője Budapesten). Az 1 km-es főszorozati csillag mellett egy fehér törpe 10 méteres lesz, azaz akkora, mint egy osztályterem, egy neutroncsillag pedig mindössze 1 cm-es, azaz egy borsószem méretével egyezik meg. (A borsószem méretű neutroncsillagnál nem sokkal kisebb egy csillagtömegű fekete lyuk, amely nagyobb gombostűfej méretű. A jelenségben a legérdekesebb, hogy közel ugyanakkora tömeg található a modellünkben 100 km-es vörös óriásban, mint a borsószem méretű neutroncsillagban.

A Tejútrendszer arányai

A Tejútrendszerben a csillagokat elég nagy távolságok választják el egymástól. Szokásos hasonlatunkban, ha a csillagokat gombostűfej méretűeknek tekintjük, néhány km távol lesznek egymástól. (Ez természetesen változó, más a haloban, a fősíkban és a magban, valamint egy halmaz belsejében.) A Napunkhoz legközelebbi csillag, a Proxima Centauri 4,25 fényévre található tőlünk, ami a gombostűfej modellben 6,75 km-t jelent.

Próbáljuk meg most az egész Tejútrendszert szemléltetni a Nap-gombostűfej méretből kiindulva. Galaxisunk fősíkjának átmérője kb. 630 ezer km-nek adódik ekkor, azaz könnyen érzékeltethető a 770 ezer km átmérőjű holdpályával. Tehát égi kísérőnk által határolt térszében lenne 100-200 milliárd csillag. Ezek eloszlása nem egyenletes, nagyrészt a fősíkban található, amely modellünkben kb. olyan vastag, mint a Föld átmérője. A fősík közepén lévő mag pedig durván akkora, mint a holdpálya átmérőjének tizede - itt vannak a legsűrűbben a csillagok. Amennyiben még kisebb modellel próbálkozunk, és például a fősík átmérőjét akkorának vesszük, mint Magyarország legnagyobb hosszát, akkor a csillagok mérete átlagosan csak 0,01 mm lesz, azaz szabadszemmel nem is láthatók.

A Lokális Halmaz arányai

Mint azt a „Lokális Halmaz” című részben már megismerhettük, az Androméda-galaxis és Tejútrendszerünk uralja ezt a rendszert, a többi galaxis hozzájuk képest apró objektum, melyek főleg ennek a két csillagvárosnak kísérői. Amennyiben a halmaz átmérőjét kb. 10 méternek vesszük, azaz akkorának, mint egy osztályterem, a Tejútrendszer fősíkja 30 cm-es korong lesz, míg az Andromédáé közel 40 cm átmérőjű. A kettőjüket elválasztó távolság ebben az esetben 4,4 méternek adódik. A halmaz többi tagja jórészt 0,5-1-2 cm-es törpegalaxis, főleg a két nagy csillagváros kísérőiként 0,5-1 m távolságban keringenek azok körül.

A szuperhalmazok arányai

A Lokális Szuperhalmaz átmérője 100 millió fényév, ami átlagosnak tekinthető, alakja azonban nem annyira elnyúlt, mint ami a környezetünkben található szuperhalmazokra jellemző. Esetünkben a Lokális Szuperhalmazt egy nagy, 200 méteres lakótelepi épülettel szemléltethetjük. Ebben a Lokális Halmaz előbbi méretei érvényesek, azaz Tejútrendszerünk 30 cm körüli átmérőjű, a Lokális Halmaz pedig mintegy 10 méteres. A háztömbben (a Lokális Szuperhalmazban) van szétszórva közel százezer galaxis. Nagyrészt kicsi, 1-2 cm-es, mazsola, dió méretű, a nagyobb elliptikusok kenyérre, dinnyére, a spirálisok pedig megtermett pizzákra emlékeztetnek. A néhány legnagyobb galaxis mérete az 1 m-t is elérheti. Az általában elnyúlt háztömbökre hasonlító szuperhalmazok közül sok egymáshoz kapcsolódik, összefüggő szerkezetet alkotnak, a közöttük lévő óriási buborékok, „belső udvarok” pedig szinte teljesen üresen panganak.

A gravitáció mindenek felett

A gravitáció a legfontosabb kölcsönhatás a Világegyetem nagyléptékű szerkezetének vizsgálatakor, így érthető, hogy a csillagászati tananyagban is kiemelt szerephez jut.

A gravitáció következtében léteznek égitestek, ez az ami a különböző objektumok anyagát összetartja.

A gravitációs erő hatására kering a Hold a Föld körül, a bolygók a Nap körül, a csillagok a galaxisok középpontja körül, a galaxisok egymás körül, stb.

A gravitációs erő hatására nehezednek a csillagok külső rétegei olyan nagy nyomással belsejükre, hogy ott akkora hőmérséklet és sűrűség uralkodjon, ami kedvez a termionukleáris fúziós reakciók lezajlásának. A Nap és az összes csillag energiatermelő folyamatai bizonyos értelemben a gravitáción alapulnak.

A gravitáció határozza meg a Világegyetem jelenét és jövőjét.

Csillagászat, valamint a részecskefizika

A részecskefizika ugyancsak fontos szerepet tölt be a csillagászati ismeretek elsajátításában. A legnagyobb probléma az általános iskolai (és sajnos gyakran a középiskolai) korosztállyal, hogy nincsenek tisztában a Világegyetem elem-eloszlásával, vagy azt csak „papíron” ismerik, és világméretűbe nem építették be. Amint az „Az elemek keletkezése” című részben végigkövethető, a Világegyetemben lévő barionikus („normális”) anyagnak az ősrobbanást követő nukleonszintézis során kb. 25%-a héliummá alakult, 75%-a pedig maradt hidrogén. (Pontosabban fogalmazva ekkor még csak hidrogén és hélium atommagok létezhettek.) Nagyvonalakban ma is ez az elem eloszlás jellemzi a Világegyetemet, tehát az olyan elemek, mint pl. a szén, a nitrogén, az oxigén, csak elenyésző kisebbségben vannak. A hidrogénnél és héliumnál nehezebb elemek (pontosabban fogalmazva majdnem az összes nehezebb elem) a csillagok nukleáris kohóiban keletkezett, majd egy részük szétszóródott a világűrben, hogy később újabb égitestek anyagába épüljön be. Tehát a hidrogén és hélium kivételével szinte az összes elem a csillagok belsejében jött létre. A papír is, melyet most kezében tart a Tisztelt Olvasó, a testében lévő összes nehezebb elem, de a nitrogén és oxigén is, melyet minden pillanatban belélegez.

Gyakori félreértés még, hogy egyesek rendkívüli helynek tartják a Földet, mert víz található rajta. A valóságban a víz egyike a Világegyetem leggyakoribb vegyületeinek, és a Naprendszer külső térségében például sokkal több található belőle, mint itt a belső vidékeken. Bolygónk azért rendkívüli hely, mert a víz itt hosszú időn át folyékony formában létezhet.

Más világok

A szűklátókörűség egyik gyakori formája, hogy az egyén a világot csak a maga körül megfigyelt formában tudja elképzelni. Egy kis képzeletbeli utazással kitérítjük tanulóink látókörét, amennyiben idő és lehetőség nyílik erre a törzsanyag mellett.

Az emberek nagy része a Napot különleges égitestnek tartja abból a szempontból, hogy míg napközben az égen látható, addig rajta kívül szinte semmilyen más égitestet nem lehet megfigyelni. Nos, ez a helyzet légkörünk következtében áll elő, és kizárólag azon égitestek sajátja, melyek nem is túl ritka és nem is túl sűrű atmoszférával rendelkeznek. Amennyiben megvizsgáljuk a Naprendszer többi égitestét, azt találjuk, egy részüket annyira sűrű gázburok

veszi körül, hogy annak aljáról se a Napot, se más égitestet nem lehet megfigyelni (pl. Vénusz, óriásbolygók). Másrészük pedig olyan ritka atmoszférával rendelkezik, hogy napközben is ugyanúgy látni a csillagokat, mint éjszaka (Merkúr, holdak többsége, kisbolygók). Csak elvétve akadnak olyanok, amelyek felszínéről napközben nem láthatók a csillagok, de a Nap mégis megfigyelhető.

Az általunk megszokott égbolt látványa sem általános a Világegyetemben. Ha csak „kis” távolságra, néhányszor tíz-száz fényévre kalandozunk el környezetünkben, már észrevehetjük a csillagképek eltorzulását. Ugyanazok a csillagok más helyről nézve más alakzatba rendeződnek. Napunk a fősíkban fekszik, így a Tejútrendszer korongjának metszetét: a Tejutat, mint az égbolton átívelő, csillagokkal sűrűn borított sávot tudjuk megfigyelni. Amennyiben galaxisunk korongja „felett” illetve „alatt” helyezkednénk el, ráláthatnánk a fényes spirálkarokra, az ég legfényesebb objektuma pedig a Tejútrendszer magja lenne, körülvéve sok apró ködös csomóval, a gömbhalmazokkal. A karok ionizált II felhőkből álló gyöngyfüzereknek tűnnének, a fősíkból pedig szupernóvarobbanások hatalmas buborékai emelkednének ki. A nagyszerű panorámáért azonban az égbolt többi részével fizetnénk, a korongon kívül ugyanis alig mutatkoznának csillagok. Kivéve természetesen, ha éppen egy gömbhalmaz belsejében helyezkednénk el. Ekkor rendkívül sok csillag lenne az égen minden irányban, miattuk már nehéz is lenne a távoli galaxisokat megfigyelni. Hasonló, csillagokkal teleszórt égbolttal számolhatunk egy olyan égitest felszínéről, amely a Tejútrendszer sűrű magjában található.

De maga a csillagos égbolt sem mondható általánosnak. Amennyiben bármely galaxison kívül merészkedünk, teljesen eltűnnének a csillagok, és csak halvány foltokat, közeli galaxisokat láthatnánk mindenfelé. A Világegyetem nagyrésztében az égbolt tehát sokkal kihaltabb, és sokkal kevésbé látványos, mint innen a Föld felszínéről.